Ing. Adolfo Di Marco

VALVULAS ELECTRONICAS

TEORIA Y APLICACIONES FUNDAMENTALES

I/. 25,000

VALVULAS ELECTRONICAS

TEORIA Y APLICACIONES FUNDAMENTALES

Prof. Ing. ADOLFO DI MARCO

VALVULAS ELECTRONICAS

1. INTRODUCCIÓN

Desde la invención de las llamadas máquinas simples, la palanca y la polea, por ejemplo, en los albores de la cultura humana, hasta los sorprendentes y últimos descubrimientos en el campo de la energía atómica, pocos dispositivos simples han tenido, acaso, una influencia tan grande en el desarrollo técnico y científico de la humanidad como la *válvula o tubo electrónico.*

La necesidad de comunicarse es esencial para las relaciones humanas, y la civilización actual descansa en el intercambio de ideas y de bienes entre los individuos y entre los grupos de individuos. Por eso la invención de la brújula y su aplicación a la navegación de altura señala con razón el arranque de una era nueva en la historia al ampliar y asegurar las rutas de comunicación. Del mismo modo, los medios eléctricos de comunicación, el telégrafo y el teléfono, reciben un impulso formidable que les permite un desarrollo hasta hace poco inconcebible con el advenimiento de la válvula electrónica. Pero, si bien ese invento encontró en las comunicaciones el primero y hasta ahora más amplio campo de aplicación, bien pronto rebasó los límites de éste y puede decirse que no hay actividades científicas o industriales donde no constituya o pudiera constituir un valioso auxiliar. Instrumentos

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723

Impreso en Argentina
Printed in Argentina

VALVULAS ELECTRONICAS

1. INTRODUCCIÓN

Desde la invención de las llamadas máquinas simples, la palanca y la polea, por ejemplo, en los albores de la cultura humana, hasta los sorprendentes y últimos descubrimientos en el campo de la energía atómica, pocos dispositivos simples han tenido, acaso, una influencia tan grande en el desarrollo técnico y científico de la humanidad como la *válvula o tubo electrónico*.

La necesidad de comunicarse es esencial para las relaciones humanas, y la civilización actual descansa en el intercambio de ideas y de bienes entre los individuos y entre los grupos de individuos. Por eso la invención de la brújula y su aplicación a la navegación de altura señala con razón el arranque de una era nueva en la historia al ampliar y asegurar las rutas de comunicación. Del mismo modo, los medios eléctricos de comunicación, el telégrafo y el teléfono, reciben un impulso formidable que les permite un desarrollo hasta hace poco inconcebible con el advenimiento de la válvula electrónica. Pero, si bien ese invento encontró en las comunicaciones el primero y hasta ahora más amplio campo de aplicación, bien pronto rebasó los límites de éste y puede decirse que no hay actividades científicas o industriales donde no constituya o pudiera constituir un valioso auxiliar. Instrumentos de medición para las finalidades más diversas; gigantescas e inconcebiblemente rápidas máquinas de calcular que economizan centenares de miles de horas de arduo esfuerzo a los investigadores y permiten la resolución de problemas de otro modo inabordables; precisos mecanismos de control que dejan regular, por decirlo así, con el toque de una pluma fuerzas enormes; ojos eléctricos que revelan y miden las débiles radiaciones de los más remotos astros que pueblan el cielo, etc., sólo son posibles gracias a la maravillosa sensibilidad del que sin duda puede considerarse como el más importante de los dispositivos eléctricos. Las posibilidades de aplicación están limitadas, tal vez, sólo por el esfuerzo que los investigadores pueden dedicar a la búsqueda de nuevos campos: se ha construido ya la primera máquina electrónica para leer, y autoridades bien conocidas estiman al alcance de la técnica actual la construcción de máquinas de escribir al dictado y de máquinas traductoras...

Hace algunas décadas no podía aceptarse que el hombre medianamente culto ignorase los principios de funcionamiento de la máquina de vapor. En la actualidad, el hombre que está animado por la sana curiosidad de conocer el mundo que lo rodea, el que aun es capaz de apreciar, como Rupert Brooke, "la sutil, tranquila belleza de una gran máquina"[1], necesita conocer los principios en que se basa el funcionamiento de la válvula electrónica, el pequeño gigante al que debe el hombre gran parte del progreso técnico que disfruta.

1 Copiamos la cita de W. W. Sawyer "Mathematician's Delight".

Para el radiotécnico y el aficionado, la más sólida base para el afianzamiento de sus ideas y el más seguro punto de partida para la adquisición de nuevos conocimientos y experiencia, es, sin duda, la perfecta comprensión de lo que ocurre dentro de esa válvula, de las razones que justifican sus maravillosas aptitudes, de lo que puede esperar de ella y de sus inevitables limitaciones y defectos. El proyecto y la construcción de toda clase de equipos electrónicos giran en torno de la válvula; es ésta quien ofrece posibilidades y quien fija límites. Y es oportuno, pues, conocerla íntimamente.

El presente volumen no tiene otro objeto que el de exponer en lenguaje sencillo, cómo es, cómo funciona y cómo se usa. Las respuestas a estas preguntas no son intrínsecamente sencillas, porque envuelven conceptos que no son corrientes en la vida cotidiana; por eso se requiere cierto esfuerzo por parte del lector para comprenderlos, esfuerzo que procuramos facilitar orientándolo con la adecuada ordenación de los temas [1] y la insistencia en los aspectos fundamentales de cada fenómeno. Se ha evitado en lo posible el uso de las matemáticas, pero presuponemos en el lector el conocimiento de rudimentos de electricidad y de simples nociones de geometría y aritmética.

2. EFECTO EDISON

Thomas A. Edison, el genial inventor norteamericano, se ocupaba en 1883 en el perfeccionamiento de su entonces más reciente invención: la lámpara incandescente. Los filamentos de fibras carbonizadas que utilizaba en las primitivas lámparas se recalentaban en algunos puntos debido a que los procedimientos rudimentarios aplicados para su fabricación no permitían obtener un diámetro uniforme a todo lo largo del hilo. En efecto, dado que el calor desarrollado por la corriente eléctrica en cada región de un filamento conductor depende de su resistencia eléctrica y ésta aumenta al disminuir el diámetro, la temperatura resulta irregular cuando el diámetro no es constante. De ahí la aparición de puntos más brillantes, es decir, de mayor temperatura. Constituye este defecto un grave inconveniente, pues a mayor temperatura corresponde mayor rapidez de evaporación de la sustancia de que está formado el filamento y, en consecuencia, reducción del diámetro en los puntos críticos y exacerbación del fenómeno. El filamento termina por fundirse y su vida resulta mucho más corta que la que corresponde a uno de diámetro uniforme.

Edison notó, además, el ennegrecimiento paulatino del bulbo de vidrio, el que reconoció como causado por partículas de carbón proyectadas en línea recta desde los puntos calientes y depositadas en las paredes interiores del bulbo. Durante la serie de experimentos que entonces inició con el objeto de corregir estas deficiencias, el inventor llegó a introducir dentro del bulbo sellado una pequeña placa metálica dispuesta entre las dos ramas de herradura del filamento.

Descubrió entonces que si esta placa se unía por un conductor externo y a través de un galvanómetro al *polo positivo* de la batería utilizada para encender la lámpara (Fig. 1), el instrumento acusaba el pasaje de una pequeña corriente eléctrica tan pronto como el filamento alcanzaba la incandescencia; el sentido de la corriente era el que iba del polo positivo de la batería hacia la placa. En cambio, no resultaba paso de corriente alguna cuando el circuito del galvanómetro se cerraba sobre el *polo negativo* de la batería en lugar de hacerlo sobre el positivo. En el primer caso era forzoso admitir que la corriente salvaba el espacio vacío entre la placa y el filamento en alguna forma entonces desconocida, puesto que se comprendía perfectamente que la corriente que *sale* por el polo positivo de una batería debe retornar a ésta por el polo negativo. El fenómeno se conoce desde entonces con el nombre de *efecto Edison*, pero no pudo ser explicado hasta años después, luego de descubrirse las propiedades elementales del electrón, pequeñísima partícula cargada de electricidad negativa que forma parte de todas las substancias conocidas y que en determinadas circunstancias puede ser liberada en enormes cantidades por un cuerpo cualquiera.

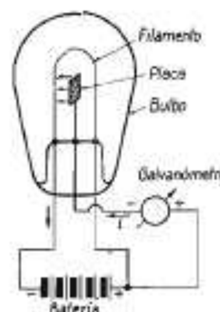


Fig. 1 – Efecto Edison. Cuando se calienta el filamento emite electrones, los cuales son atraídos por la placa, que es positiva con respecto a la mayor parte del filamento. Los electrones penetran en la placa y se mueven por los conductores. Se revelan como una corriente eléctrica *i*, de sentido opuesto al del desplazamiento de los electrones.

La explicación del efecto Edison es sencilla si se admite que los cuerpos calientes emiten electrones, los cuales por tener carga eléctrica negativa son atraídos por la placa introducida en el bulbo cuando ella está unida al polo positivo de la batería y tiene, por lo tanto, carga positiva. Salvan así el espacio vacío comprendido entre el filamento y la placa, y llegan finalmente al polo positivo de la batería. En el conductor, y por lo tanto a través del galvanómetro, se establece un flujo de cargas eléctricas negativas que van de la placa a la batería. Los electrones perdidos por el filamento son restituidos a éste por la batería misma, de cuyo polo negativo parten para llegar a la porción caliente de aquél.

Respetando las convenciones ya aceptadas desde mucho antes de descubrirse el real mecanismo de la conducción eléctrica, el movimiento de los electrones en el seno del conductor resulta en una *corriente eléctrica* con sentido opuesto, en este caso el que va del polo positivo de la batería a la placa, y de la rama izquierda del filamento al polo negativo de la batería. El movimiento de los electrones y la corriente eléctrica tienen, pues, sentidos opuestos. Se preguntará el lector el porqué de esta convención tan contradictoria, y su pregunta no hallará otra respuesta que la que la atribuye a la casualidad y al respeto por la tradición. En efecto, los nombres de electricidad positiva y electricidad negativa fueron atribuídos arbitrariamente a diferentes manifestaciones de la electricidad y se llegó a admitir que sólo la electricidad positiva tenía existencia independiente de la materia y podía pasar de un cuerpo a otro. Como sentido de la corriente eléctrica se adoptó, en consecuencia, el del movimiento de las cargas positivas, en cuya existencia libre se creía. El descubrimiento del electrón demostró, en cambio, que es el

[1] Hemos marcado con asterisco * algunos párrafos que ofrecen dificultades de orden matemático, la mayoría de los cuales publicamos como Apéndice al final del libro; por otra parte, no son esenciales para la comprensión del resto del texto. Los incluimos como complemento, para los estudiantes más adelantados.

movimiento de las cargas denominadas negativas el responsable de la conducción en los metales, pero ya era demasiado tarde para modificar las convenciones.

Volviendo al efecto Edison, la teoría electrónica explica también la desaparición de la corriente cuando la conexión del galvanómetro se cambia al polo negativo de la batería. En este caso, la placa toma una carga negativa y rechaza así a los electrones en lugar de atraerlos.

Edison, al igual que otros investigadores que observaron el mismo fenómeno, se limitaron a dejar constancia de él en sus memorias, sin preocuparse por encontrarle aplicación práctica en la técnica de entonces. Más tarde, J. A. Flemming al realizar una larga serie de experimentos sobre el efecto Edison, entre 1889 y 1896, fué el primero en sugerir el aprovechamiento de la singular posibilidad de conducir corriente en un solo sentido para la "detección" o "rectificación" de las oscilaciones de radiofrecuencia que por entonces comenzaron a utilizarse en la comunicación inalámbrica. En 1904, Flemming obtuvo la primera patente para cubrir el uso del dispositivo original de Edison como "detector" o "receptor" en los aparatos radiotelegráficos.

3. TEORÍA ELECTRÓNICA

* 3.1 — Antes de entrar en la descripción de las válvulas en las cuales el efecto Edison puede considerarse como el punto de partida, conviene que nos detengamos siquiera brevemente en la teoría atómica de la materia, la que ha de permitirnos la explicación del fenómeno fundamental conocido con el nombre de *emisión electrónica*.

Desde hace mucho tiempo se admite que todas las substancias conocidas están formadas por la aglomeración de partículas submicroscópicas (es decir, no visibles aún con los microscopios más poderosos) denominadas moléculas. Las moléculas pueden considerarse como la porción más pequeña de una substancia que conserva aún las propiedades que caracterizan al cuerpo del que provienen. La subdivisión posterior de la molécula conduce a los llamados *elementos químicos*, de los cuales se conocen al presente 92. A su vez, la subdivisión más pequeña de un elemento químico es el átomo. Las moléculas, cualquiera que sea la substancia a que pertenecen, están, pues, formadas por la agregación de algunas (como excepción, por una sola) de las noventa y dos clases de átomos conocidos. Una molécula de agua, por ejemplo, está formada por la combinación de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, dos de los elementos químicos fundamentales.

Pero el átomo no es en sí mismo una partícula de contextura simple, como se creyó hasta hace relativamente poco tiempo. Por el contrario, a pesar de su casi inconcebible pequeñez, constituye un conglomerado de partículas elementales aun mucho más pequeñas. Cada átomo consiste en un núcleo rodeado por cierto número de electrones y se lo concibe, desde un punto de vista elemental, como un minúsculo sistema planetario en el que el núcleo ocupa el lugar del sol y los electrones el de los planetas. El electrón es una partícula muy pequeña, a pesar de lo cual ha sido posible estimar sus dimensiones. Los cálculos arrojan para el radio, suponiendo al electrón esférico, tan sólo 10^{-15} metros, es decir, 0,000 000 000 000 001 m ¡la milésima parte de un billonésimo de metro! La carga eléctrica del electrón, negativa, determinada por medio de variadas pero delicadísimas experiencias, se estima actualmente en $1{,}601 \times 10^{-19}$ coulomb; para formar un coulomb de electricidad, es decir, la carga que transporta una corriente de un ampere al cabo de un segundo, se requieren entonces $1 \div (1{,}601 \times 10^{-19}) \cong 6 \times 10^{18}$ electrones; es decir, 6 millones de billones. Además de carga eléctrica, el electrón tiene cierta masa mecánica, la que se estima en $9{,}107 \times 10^{-28}$ gramo, es decir, se necesitan aproximadamente 1100 billones de billones de estas ligerísimas partículas para formar un gramo. Es la pequeñísima masa del electrón la que explica la rapidez con que actúan los dispositivos electrónicos, masa que por otra parte está asociada a una carga eléctrica, que si bien es pequeña en sí misma, es enorme en relación a la masa que la transporta. La importancia de esta relación pone en evidencia calculando la carga eléctrica contenida en un

gramo de electrones; el cálculo arroja la cifra de $1{,}76 \times 10^{8}$ coulombs (176 millones): Para depositar esta carga en un capacitor de 1 microfarad se necesitaría elevar la diferencia de potencial entre sus armaduras nada menos que a 176 billones de volts! Como la capacitancia del globo terráqueo es de menos de 700 microfarads, resulta que de desparramar sobre la tierra un gramo de electrones, el potencial de aquél se haría ¡un cuarto de billón de volts más negativo! Los terribles efectos del rayo se deben a la transferencia de algo así como de una fracción de miligramo de electrones entre la tierra y las nubes.

El núcleo del átomo es una partícula compleja, la que, si bien no es de mucho mayor tamaño que el electrón, concentra la mayor parte de la masa total del átomo.

El átomo más sencillo conocido es el del hidrógeno común. Su núcleo es el más liviano de todos, con una masa igual a 1840 veces la del electrón. El átomo de hidrógeno en estado normal contiene un solo electrón. Los demás elementos químicos tienen estructuras atómicas más complicadas. El más pesado entre los que se encuentran en la naturaleza dotados de cierta estabilidad es el uranio; su núcleo es cerca de 240 veces más pesado que el de hidrógeno, y al estado normal va acompañado de 92 electrones.

Los elementos químicos se catalogan según el llamado *número atómico*; éste no es otra cosa que el número de electrones que forman la cuota normal del átomo completo; es, por lo tanto, de 1 para el hidrógeno y de 92 para el uranio. El átomo completo es eléctricamente neutro. Y dado que sus electrones contienen una carga eléctrica negativa bien definida, resulta aceptable admitir que el núcleo contiene una carga positiva de igual magnitud.

Los electrones están dispuestos en torno del núcleo en *capas esféricas* o *niveles* de diferentes radios. Los que ocupan la capa de mayor radio se llaman *electrones de valencia* y son los que determinan el comportamiento químico del átomo. Cuando dos átomos diferentes se ponen en proximidad, los electrones de valencia pueden pasar, en ciertos casos, de un átomo a otro; los átomos quedan así ligados y forman una *molécula*.

En los metales, los átomos están dispuestos los unos con relación a los otros con cierta regularidad geométrica. Los metales tienen, se dice, *estructura cristalina*, es decir, análoga a la de las piedras preciosas talladas. Los cristales metálicos no se advierten a simple vista porque son muy pequeños, y un trozo de cobre, por ejemplo, está formado por miríadas de pequeños cristales conglomerados. Lo importante desde nuestro punto de vista es que los núcleos atómicos están muy próximos unos de otros, tanto que los electrones de valencia encuentran libertad de movimiento y se hallan en realidad en un estado permanente de agitación, moviéndose desde la esfera de atracción de un núcleo a la de otro, incansablemente. Experimentalmente se ha encontrado razonable admitir que hay término medio un electrón en estas condiciones por cada átomo metálico; con esta hipótesis se calcula que hay alrededor de 10^{22} (diez mil millones de billones) de *electrones libres* en cada centímetro cúbico de una masa metálica.

Una masa metálica puede concebirse, de acuerdo con la teoría esbozada, como un conglomerado de átomos relativamente fijos entre el cual una cantidad enorme de electrones libres se hallan en un movimiento desordenado. Estos electrones, que se llaman *libres* para diferenciarlos de los que se encuentran más estrechamente ligados al átomo, se comportan en cierto modo análogo a las moléculas de un gas contenido en un recipiente; el nombre de *gas electrónico*, que a veces reciben, obedece a esta comparación. Como ocurre con las moléculas de gas, al elevarse la temperatura del cuerpo el movimiento de los electrones libres se activa.

La existencia de los electrones libres en el seno de los metales explica su *conductividad eléctrica*, es decir, la facilidad con que permiten el pasaje de la corriente. En efecto, si una región del cuerpo metálico se mantiene, por ejemplo mediante una batería, eléctricamente positiva con respecto a otra, los electrones libres sufren, como cargas negativas que son, la atracción de la zona positiva y tienden a desplazarse hacia ella. Su movimiento de agitación, esencialmente desordenado, se orienta de tal modo que da como resultado un *desplazamiento neto* de carga eléctrica negativa hacia la región positiva del cuerpo, es decir, una corriente eléctrica. La velocidad de este desplazamiento neto de las cargas es mucho más pequeña que lo que ordinariamente se cree, pues no pasa de algunos centímetros por segundo.

* **3.2 — Emisión electrónica.** Estamos seguros de que al llegar a este punto el lector curioso se habrá preguntado por qué, si tantos electrones movibles se en-

cuentran en un pedazo de metal, algunos de ellos no abandonan definitivamente sus límites. Y probablemente habrá hallado por sí mismo la respuesta elemental adecuada si tiene frescos sus conocimientos de *electrostática*. Pero de todos modos será conveniente que la aclaremos aquí.

Imaginemos un pedazo de cobre, mantenido sobre soportes aislantes y en estado eléctrico neutro. Esto significa que las cargas de sus billones de billones de electrones libres están exactamente compensadas por las cargas positivas de los núcleos. Y pensemos en uno de esos electrones errantes con ansias de ver mundo, el que en un instante cualquiera se encuentra en condiciones, por el sentido eventual en que se mueve, de atravesar la superficie del metal y asomarse al exterior. En cuanto la atraviesa, ¿qué ocurrirá? Pues, sencillamente, que en cuanto la atraviese *dejará* tras de sí un cuerpo cargado *positivamente*, el cual en virtud de aquello de que cargas de opuesto signo se atraen, obligará al díscolo a retornar a su hogar. Todavía podemos llevar nuestro razonamiento un *poco* más allá: la fuerza de atracción entre dos cargas de diferente signo depende no sólo de la magnitud de las cargas sino también de la distancia entre ambas: es tanto mayor cuanto menor es el *cuadrado* de esa distancia. Cuando el electrón indisciplinado está *justamente* atravesando la superficie del metal, la distancia es cero y la fuerza de atracción *infinitamente grande*. No es posible vencer una fuerza infinitamente grande y, por lo tanto, resulta aparentemente imposible en absoluto que el electrón se aparte del metal. El efecto Edison demuestra, con la contundencia de su realidad experimental que nuestro razonamiento adolece de alguna falla importante en esta parte. Y no es difícil descubrirla. ¿Tenemos, en efecto, derecho de hablar de superficie del metal cuando tratamos de explicar el comportamiento de una partícula tan diminuta como lo es un electrón? La respuesta es un "no" rotundo. *El* metal, dijimos, está formado por un conglomerado de átomos que guardan distancias bien definidas entre ellos mismos; en realidad, el espacio vacío en el seno de un metal es mucho mayor que el efectivamente *ocupado* por los átomos; no puede hablarse, en consecuencia, de una superficie límite del metal con el concepto geométrico de lo que entendemos por superficie; apenas si tenemos derecho a hablar de la "capa externa" de átomos. Y la distancia entre el electrón que intenta una escapatoria y la *superficie* del metal no puede ser nunca cero, porque tal *superficie*, simplemente, no existe.

El simple gráfico de la Fig. 2 nos ayudará a explicar lo que en realidad ocurre. Las pelotitas negras representan los átomos del metal, una última capa *de los* cuales se supone distribuida paralelamente al eje vertical. La curva llena *a* representa cualitativamente cómo varía la fuerza que obra sobre un electrón que ha escapado, suponemos por el punto *O*, corriéndose con dirección *OX*, en función de la distancia recorrida a partir de la última capa de átomos. Dicha fuerza es al principio *nula*, pero crece *rápidamente* hasta alcanzar un valor máximo *bc* cuando la distancia es igual a *Ob*. A partir de este momento, la fuerza disminuye a valores cada vez más pequeños conforme aumenta la distancia, de modo que si nuestro electrón trotamundos consigue alejarse, digamos hasta el punto *e*, habrá salvado la peor parte y podrá sentirse desligado del metal. Pero para llegar al punto *e* o sobrepasarlo ha tenido que *vencer* la fuerza que lo impelía a retornar; *para el* físico, vencer una fuerza es realizar *trabajo*; el electrón ha *tenido* que realizar cierto trabajo, y para ello ha tenido que gastar *capacidad de producir trabajo*, es decir, lo que el físico llama *energía*. La *energía* es la capacidad de producir trabajo que tienen los cuerpos y los *sistemas* de cuerpos. Llegamos así a entrever la razón por la cual no escapan,

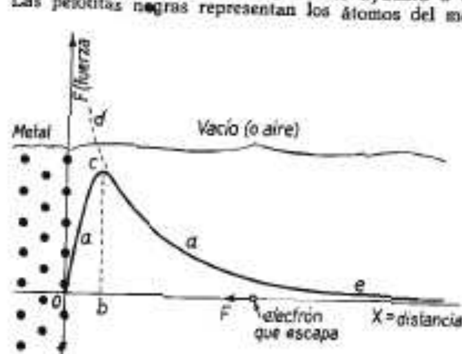


Fig. 2 – Un electrón que escapa es atraído hacia el metal con una fuerza *F*, que depende de la distancia y pasa por un valor máximo cuando el electrón ha recorrido la distancia O-b, del orden del radio de un átomo.

normalmente, todos los electrones libres del metal: para estar en condiciones de escapar deben poseer cierto mínimo de energía, y en el estado normal de un trozo de metal sólo un número despreciable, si no nulo, de electrones la poseen a la temperatura ambiente. Por eso el efecto Edison no se manifiesta cuando *el filamento* de la lámpara está frío.

Cuando se lleva el filamento de la lámpara a unos 2000 grados de temperatura, ya es otra cosa. ¿Por qué? *Pues* porque calentar un cuerpo cualquiera es suministrarle energía. *Calor* y energía son la misma cosa. Cuando se quema carbón se produce calor, pero este calor, por medio de la caldera, el vapor, los pistones y las bielas, se traduce finalmente en el trabajo necesario para arrastrar un tren; es decir, el calor es energía. Los electrones libres reciben una parte de la energía entregada al cuerpo al calentarlo; algunos más que otros: algunos en cantidad suficiente para vencer a la barrera de fuerza que les impide escapar. Cuando la temperatura del cuerpo es suficientemente alta el número de electrones que se ponen en condiciones de escapar, y escapan, se hace considerable, hasta el punto de hacer posible *observar* una corriente de algunos miliamperes en la instalación de la *Fig. 1*. Y téngase presente que una corriente de un miliampere representa nada menos que ¡6000 billones de electrones por segundo!

El fenómeno de *escape* de electrones de los cuerpos calientes se conoce con el nombre *de emisión termoiónica*, bastante desdichado por cierto; más correcto sería llamarlo *emisión térmica*, o si se prefieren los nombres más complicados, *emisión termoelectrónica*. Los tubos electrónicos en los que se obtienen los electrones por medio del mecanismo que acabamos de explicar, es decir, por el calentamiento de un cuerpo conductor, se llaman *válvulas* o *tubos termoiónicos*, para diferenciarlos de los que apelan a otros tipos de fuente de electrones.

Es claro que el ingeniero no se contenta con saber que los electrones se *escapan* cuando se calienta el *cátodo* (así se llaman los cuerpos emisores *de electrones*) de un tubo. Necesita saber cuántos se escapan en un tiempo dado, por ejemplo en un segundo. De otro modo resultaría un *verdadero* rompecabezas construir un tubo termoiónico, como es fácil imaginarlo. Dos investigadores, Dushman y Richardson (¡vale la *pena* recordar sus nombres!) establecieron, independientemente, una ecuación de aspecto un tanto imponente, que permite el cálculo. La ecuación es la siguiente:

$$I = AT^2 \varepsilon^{-b/T} \quad \text{(amperes/cm}^2\text{)}$$

Si usted no está familiarizado con las ecuaciones no trate de recordar esta fórmula ni de interpretarla por su cuenta. No es necesaria para su trabajo ni para *comprender* lo que sigue. Pero le diremos que la fórmula no da el *número* de electrones por segundo sino la corriente I en amperes *por cada* centímetro cuadrado de cátodo que esos electrones producirían *en la* fa Fig. 1. A la derecha del signo =, la letra T representa la *temperatura absoluta* (la temperatura que se lee en un termómetro común *más* 273), y además aparecen las letras A y b. Estas letras están porque el fenómeno de la emisión se presenta un poco diferentemente según el material del cátodo. Lo que la ecuación nos dice es que la corriente emitida por cada centímetro cuadrado de cátodo depende del *material del cátodo*, y para una clase dada de cátodo, de su temperatura. El término $\varepsilon^{-b/T}$ expresa que esa variación es, principalmente, del tipo que los que utilizan las matemáticas llaman exponencial.

Al estudioso, esa ecuación le dice otras cosas. Pero el mismo estudioso acude *a su* recurso más objetivo para aclarar la marcha de un fenómeno: el *empleo* de curvas o gráficos. Los usaremos mucho en este texto, y si *usted* encuentra alguna dificultad en interpretarlos es mejor que se haga explicar los fundamentos de la representación gráfica por alguna *persona* entendida: aquí nos llevaría demasiado espacio. La mayoría de *los* técnicos y aficionados de la radio los conocen bien. La Fig. 3 representa la corriente I emitida por tres diferentes tipos de cátodos como función (es decir, para cada valor) de la temperatura. Observe, por ejemplo, que un cátodo de "tungsteno" comienza a emitir recién a los 2200° de temperatura, mientras que uno de "tungsteno toriado" emite un ampere por cm² a 1900° y el "revestido de óxido" la misma corriente a sólo unos 1250°. Observe también que las curvas son *muy* empinadas, lo que significa que un pequeño cambio de temperatura produce una variación muy grande de la emisión. Tenga en la memoria esta observación, porque *es* una de las razones por las cuales la tensión de la batería con que *se* calientan los cátodos debe mantenerse estable.

Los tres tipos de cátodos tomados como ejemplo se usan en la práctica, aunque a primera vista nos quedaríamos con el de óxidos. Después hemos de ver por qué no puede prescindirse de los otros.

*** 3.3 — Otras formas de emisión.** En el párrafo anterior hemos dicho que un electrón necesita cierto mínimo de energía para escapar y que el calentamiento, al suministrar este mínimo a algunos electrones, los pone en condiciones de emigrar. Pero el calor no es la única forma de energía que puede llegar a los electrones del metal. El térmico no es el único método capaz de obtener electrones escapados. Hay otras posibilidades y entre ellas dos que nos interesan particularmente: *La emisión fotoeléctrica* y la *emisión secundaria.*

La luz es una forma de la energía, energía electromagnética, la misma que la de las ondas de radio. Se puede decir mucho de cómo un haz de luz transporta energía, pero lo importante para nosotros es que cuando ese haz ilumina una superficie metálica (sobre todo si se trata del metal llamado *cesio*) por un mecanismo muy complicado que ni siquiera se conoce a ciencia cierta, esa energía puede ser transferida a los electrones libres en cantidad y condiciones tales como para habilitar a algunos de ellos a escapar rompiendo la barrera de fuerza que los contiene. En eso consiste la *emisión* o el *efecto fotoeléctrico,* tan importante para la televisión y para la confección de tantos aparatitos ingeniosos, como aquellos que hacen arrancar automáticamente las escaleras mecánicas cuando una persona interrumpe con su cuerpo un rayo de luz.

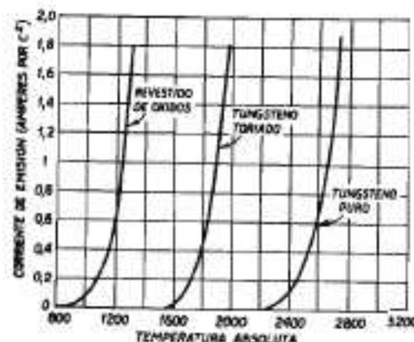


Fig. 3 – Variación de la emisión con la temperatura para varios tipos de cátodos. Un ampere equivale a la emisión de 6 trillones de electrones por segundo.

La *emisión secundaria* es un fenómeno más mecánico. Cuando un electrón se proyecta violentamente contra una superficie metálica, la energía de que va animado en virtud de su velocidad revoluciona un tanto el "tranquilo desorden" en que se hallan los electrones libres; algo así como ocurriría si se arrojara una bola de billar contra un grupo de otras: éstas se desbandan, entrechocan y alguna salta la baranda; del mismo modo algunos de los electrones libres así conmocionados saltan la "baranda" de fuerza y escapan. Lo de *secundario,* aplicado al fenómeno y también a los electrones que por él se obtienen, se justifica porque necesitamos otros electrones (*electrones primarios*) para provocarlo.

3.4. — Ionización de los gases y de los vapores. Hay otra forma de escape de los electrones del cuerpo que los contiene, que es importante en el funcionamiento de los tubos electrónicos; es la que se conoce con el nombre que sirve de título al presente párrafo. Los gases y los vapores son cuerpos que se caracterizan porque sus moléculas son relativamente independientes las unas con respecto a las otras y están animadas de una constante agitación, cuya actividad aumenta con la temperatura. La *presión* que un gas o un vapor ejerce sobre las paredes del recipiente no es sino el resultado del choque de sus moléculas con tales paredes: el aumento de presión que acompaña siempre el aumento de temperatura es consecuencia de la activación del movimiento de las moléculas, y con ella, de la cantidad e intensidad de los choques con las paredes.

Si se proyecta un electrón animado de conveniente velocidad a través de una cantidad de vapor o de gas, hay cierta probabilidad de que el electrón, a pesar de su pequeñez, choque con alguna molécula. Si se dan circunstancias favorables, el resultado de la colisión es el desprendimiento de alguno de los electrones de valencia de la molécula o de los átomos que la componen. Cuando una molécula o un átomo ha perdido uno o más electrones, su carga eléctrica *neta* queda positiva: se convierte así en una partícula bastante pesada, comparada con el electrón, y cargada con electricidad positiva. Es un ion *positivo.*

Este proceso es en general *acumulativo*: esto quiere decir que el electrón escapado choca a su vez con otra molécula y la ioniza también; el nuevo electrón, junto con los dos que ya teníamos, vuelven a chocar y a ionizar, y así sucesivamente.

En la lámpara de Edison de la Fig. 1 la ionización se presenta cuando el vacío de la ampolla es bastante imperfecto como para dejar dentro de ella una cantidad conveniente de aire. Los electrones necesarios para iniciarla son suministrados por el filamento caliente y acelerados por la atracción de la placa positiva.

La ionización va a menudo acompañada por la luminiscencia del gas, ese brillo de suave color azul o violáceo que se observa en algunas válvulas cuando conducen corriente, o en las ordinarias lámparas de neón. El origen de esa luminiscencia es algo difícil de explicar aquí, pero es bueno saber que resulta de la conversión de la energía en luz. Si usted está interesado en conocer mejor el fenómeno, conviene que lea el capítulo correspondiente a "Descarga luminiscente" en algún buen tratado elemental de Física.

La ionización altera completamente la marcha del fenómeno de la conducción eléctrica entre el cátodo y la placa. Hay tubos donde se la provoca ex profeso, y otros donde se trata de evitarla por todos los medios; depende de lo que se pretende de ellos. En otro lugar veremos algo más sobre este asunto.

Antes de dejar el tema diremos que, aparte de los electrones acelerados, hay otros *agentes* de ionización. De interés para nosotros es la ionización que se produce cuando una masa de gas se "ilumina", sea con luz visible, sea con rayos X. También producen ionización esos rayos más o menos misteriosos que los físicos llaman *rayos cósmicos* y que provienen de alguna fuente desconocida en la inmensidad de los espacios siderales. Estos tipos de ionización, aunque poco importantes por su "volumen" (por decirlo así), son muy importantes porque se hallan siempre presentes, de modo que en cualquier gas o vapor se puede reconocer una débil ionización permanente.

4. TIPOS DE CATODO

Todas las válvulas electrónicas necesitan electrones para funcionar, de modo que es en ellas esencial la presencia de una fuente productora de electrones o *cátodo.* Diferentes tipos de cátodo se usan en la práctica para satisfacer diferentes necesidades. Una primera clasificación atiende al modo cómo se provoca el escape de los electrones, y entonces, de acuerdo con lo expuesto en el capítulo precedente, reconoceremos el *cátodo térmico* y el *cátodo fotoeléctrico* como los primeros en importancia para nosotros. Los tubos que basan su funcionamiento en el primero se llaman *termoiónicos*; los que aprovechan el segundo, *fotoeléctricos.*

Nos referiremos ahora con cierta detención a los cátodos térmicos.

4.1 — Cátodos de tungsteno. En la primitiva lámpara de Edison se usaban como filamentos fibras vegetales carbonizadas. No es el caso de explicar aquí los inconvenientes del filamento carbónico y las razones por las cuales en las lámparas de alumbrado más modernas se utilizaron y se utilizan filamentos de *tungsteno*. El tungsteno es un metal muy duro, que se funde recién a los 3600° de temperatura absoluta; la temperatura de fusión es muy importante en los filamentos de las lámparas de alumbrado, porque preferimos la luz blanca de las lámparas modernas al resplandor rojizo de las antiguas, y el color de un cuerpo caliente es tanto más blanco cuanto más alta es la temperatura. Esto lo saben bien los herreros que juzgan la temperatura del hierro por su color. Como el tungsteno se funde a 3600°, se puede mantener a más de 2000° durante largo tiempo. Las lámparas de alumbrado terminan por "quemarse" porque mucho antes de llegar al punto de fusión el metal del filamento se evapora, el hilo se adelgaza y como siempre alguna parte del filamento está más caliente que las otras a causa de la inevitable falta de perfecta homogeneidad de la construcción, en esa parte la evaporación es más activa y ella se transforma en "lo más delgado del hilo"; llega el momento en que el filamento se funde en ese punto. No es que intentemos ahora ocuparnos del alumbrado, pero lo que hemos dicho de las lámparas se aplica a las válvulas electrónicas.

Para que un metal sirva como cátodo práctico es necesario que pueda mantenerse a una temperatura lo bastante alta como para que la emisión sea copiosa sin que la rapidez de evaporización llegue a ser excesiva.

El tungsteno es el metal puro que mejor satisface esta condición; le sigue el tántalo. Por eso el uso del tungsteno para la construcción de filamentos catódicos se generalizó rápidamente y era exclusivo hasta allá por el año 1925.

A pesar de que el tungsteno toriado y los revestimientos de óxido son mucho más eficientes que el tungsteno como emisores, éste sigue utilizándose al presente en las válvulas grandes de radio, en los tubos de rayos X, etc. La razón es la siguiente: Es imposible hacer un vacío perfecto dentro de una ampolla; siempre queda algo de aire, y más aún, quedan gases embebidos en el vidrio y en las partes metálicas del tubo, gases que con el tiempo van liberándose y empeoran, en consecuencia, el vacío. Esos gases se ionizan, como hemos visto, por el choque de los electrones, y los iones positivos son atraídos por el cátodo (negativo) y se precipitan contra él. Si el cátodo es muy negativo con respecto a la placa, los iones alcanzan una velocidad grande y el choque tiene resultados que podríamos llamar "minúsculamente catastróficos": Hay que pensar en una lluvia de millones de partículas diminutas, como el granizo que destruye las cosechas a pesar de su pequeñez individual; del mismo modo, los iones terminan por destruir el cátodo por acción mecánica, si éste no es suficientemente resistente. El tungsteno es un metal durísimo y soporta muy bien la granizada de iones. Por eso, al consultar cualquier manual de válvulas "transmisoras" verá usted que las más grandes, aquellas que trabajan con tensiones de placa superiores a 5000 volts, tienen casi siempre "filamento de tungsteno puro". De paso observe que esos filamentos se alimentan (para calentarlos) con tensiones de 10 ó 20 volts y toman corrientes a veces de centenares de amperes. Si multiplica los amperes por los volts obtiene la "potencia de calefacción" en watts; si divide por mil y multiplica por las horas de funcionamiento obtiene los kilowatt-horas consumidos... y si consulta las tarifas del servicio público de electricidad se convencerá de que los cátodos de tungsteno puro son muy buenos pero cuesta muchos pesos mantenerlos calientes.

4.2 — Cátodos de tungsteno toriado. Para abaratar el mantenimiento de las válvulas convienen cátodos más eficientes. Uno de ellos se obtiene adicionando *torio* al tungsteno. El torio no puede usarse puro porque su temperatura de fusión (2100°) es muy baja para hacerlo rendir. Cuando un filamento de tungsteno está embebido de torio y se calienta, el torio se deposita sobre la superficie del tungsteno en una capa finísima, posiblemente del espesor de un átomo de torio. En estas condiciones, a unos 1900° el torio (¡no el tungsteno!) emite copiosamente. También se evapora, pero a medida que la capa activa se gasta, nuevas cantidades del torio mezclado con el tungsteno reemplazan a los átomos evaporados. Cuando todo el torio se ha gastado la válvula ha muerto; la emisión del tungsteno puro es despreciable a esta temperatura.

La temperatura de trabajo de un filamento de tungsteno toriado (y por lo tanto la tensión con que se alimenta el filamento) es crítica. Si excede o es menor que la que el fabricante recomienda se producen casos de "muerte aparente". En efecto, el mantenimiento de las condiciones de emisión exige que el torio evaporado se reemplace por una cantidad exactamente igual del torio que va aflorando a la superficie. Y esta igualdad se satisface a una temperatura muy definida. Si se excede la temperatura o si es menor que la necesaria, la evaporación es más rápida que el afloramiento, la capa desaparece por evaporación y la emisión se extingue. La muerte del cátodo es aparente, decimos, porque todavía hay torio en el filamento. Este puede resucitar si se le aplica un tratamiento de "primeros auxilios" adecuado. A este tratamiento los ingenieros lo llaman "reactivación". Los fabricantes de válvulas le darán explicaciones sobre el tratamiento más adecuado para sus tubos si usted se los pide. Sígalas estrictamente.

Se le ocurrirá al lector que esa "capa activa" de torio no puede ser tan resistente como la misma superficie de tungsteno al granizo iónico. Por eso las válvulas que emplean esta clase de cátodos no soportan tan bien las altas tensiones. Al mejorar los procesos de vaciado de la ampolla, los filamentos de torio se han venido utilizando para voltajes cada mez mayores, y hoy en día hay válvulas de mucha potencia que los utilizan. También es importante aumentar la resistencia de la capa por medio de un tratamiento especial, llamado de *carbonización*.

Al trabajar con temperaturas menores y emitir más corriente por unidad de superficie, estos filamentos requieren mucho menor potencia de calefacción que los de tungsteno puro. Y es conveniente no sólo por la cuestión pesos sino por otras causas que no podemos discutir aquí, pero que se vinculan con la cuestión "zumbido" en los transmisores.

4.3 — Cátodos revestidos de óxidos. Los óxidos de estroncio y de bario (otros metales con nombres raros) emiten copiosamente a temperaturas muy bajas (de 900° a 1100°). Pero se evaporan con gran

rapidez a temperaturas igualmente bajas. Se puede recurrir a un artificio para salvar este inconveniente y aprovechar sus excelentes cualidades emisivas. Se toma un alambre metálico, níquel, tántalo, etc., (no es muy importante porque la temperatura es baja), y se lo reviste de una capa de compuestos químicos (carbonatos) de esos metales. Aplicando un procedimiento especial de activación resulta un cátodo con las excelentes cualidades previstas.

Desafortunadamente la resistencia al bombardeo iónico es pobre y por otra parte la fácil evaporación de estas substancias impide lograr un buen vacío. Por eso no puede pensarse por el momento en utilizar estos cátodos en válvulas que trabajan con tensiones altas, de modo que quedan relegados a las de pequeña potencia. No debe creerse que su importancia técnica es escasa por tal razón; al contrario, este es el tipo de cátodo que se utiliza en los miles de millones de válvulas receptoras que se han fabricado en las últimas décadas. Su ventaja principal es la de la economía que representa lo escaso de la potencia de calefacción necesaria.

4.4 — Cátodos de calentamiento directo y cátodos de calentamiento indirecto. Con intención hemos venido utilizando hasta ahora un poco al acaso los términos "filamento" y "cátodo". El nombre "filamento" proviene de los *filamentos* (hilos) usado en las lámparas de alumbrado. El término se transvasó a la técnica del tubo electrónico. El filamento, como hilo metálico utilizado para proveer electrones por efecto térmico, representa una manera de realizar prácticamente el *cátodo térmico*. Tiene como peculiaridad que el dispositivo o pedazo de metal emisor se aprovecha al mismo tiempo para producir, por efecto Joule de la corriente eléctrica, el calor necesario para llevar su temperatura al punto requerido. Esto se expresa con menos palabras al decir que los filamentos son *cátodos de calentamiento directo*. Evidentemente no es este método el único que puede utilizarse para calentar un pedazo de metal que ha de funcionar como cátodo. Podemos indicarle otro: la llama de gas de su cocina. Tome una varilla de hierro y exponga su extremo a la llama: cuando se pone al rojo tiene usted a su disposición unos cuantos billones de electrones, y su varilla es, en definitiva, un "cátodo de calentamiento por llama". Desde luego no nos animamos a inducirle a construir una válvula con tal cátodo: es muy incómodo. Es más práctico seguir utilizando la electricidad para calentar el cátodo, y la muestra de cómo puede hacerse la tiene en su soldador eléctrico. Si le saca la punta de cobre tendrá una imagen exacta de cómo es lo que se llama *cátodo de calentamiento indirecto*. El cátodo propiamente dicho, la parte que emite electrones, es el tubo externo del soldador; la "resistencia" de su soldador, un pedazo de alambre de "nichrome" arrollado en espiral y aislado del tubo externo por medio de material refractario, es el *calefactor* del cátodo. Cuando pasa una corriente por la resistencia (el calefactor) se calienta y el calor pasa al tubo externo. Si usted olvida de desenchufar el soldador tendrá al poco rato un modelo muchas veces ampliado del cátodo de calentamiento indirecto que usan las válvulas de su receptor.

Tal vez usted conozca esos soldadores modernos tipo pistola y tenga uno. En éstos la punta de soldar actúa al mismo tiempo como resistencia de calefacción. Este soldador es de *calentamiento directo*, el antiguo es de *calentamiento indirecto*.

Los cátodos de calentamiento indirecto se construyen solamente en el tipo revestido de óxido, porque en los otros las altas temperaturas hacen este método poco práctico. En la realidad, consisten en un tubito de níquel revestido exteriormente con la substancia activa y que alberga en su interior el calefactor, un alambre en espiral, o no, de tungsteno u otro material adecuado, el cual se aísla del cilindro con substancias refractarias.

Estos cátodos necesitan, a igualdad de superficie activa, más calor que los de calentamiento directo. Por eso, en las válvulas donde la economía de energía es un premio, por ejemplo en las que se utilizan en los equipos portátiles alimentados por baterías, se prefieren los de calentamiento directo. Consulte su manual de válvulas.

La principal ventaja del cátodo de calentamiento indirecto es la que se deriva de la independización de la función principal que es la de emitir electrones de la secundaria, la calefacción. Permiten usar corriente alterna para esta última función sin inconvenientes de zumbido y, cuando varias válvulas se alimentan de la misma fuente, aplicar a cada cátodo la tensión con respecto a masa que resulte necesaria. La Fig. 4 ilustra construcciones usuales para los dos tipos de calentamiento.

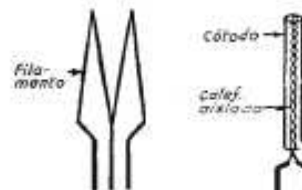


Fig. 4 – a) Cátodo de calentamiento directo (filamento en W). b) Cátodo de calentamiento indirecto.

4.5 — Cátodos líquidos. En algunos dispositivos electrónicos de carácter industrial se usa una cubeta de mercurio (un metal líquido, como se sabe) en las funciones de cátodo. El proceso de emisión en este caso, aunque térmico en esencia, es bastante complicado y su descripción escapa a los límites del presente texto.

5. EL DIODO Y SUS APLICACIONES

Estamos ahora en condiciones de empezar a describir y analizar las válvulas electrónicas modernas, comenzando, desde luego, por la más sencilla de todas, que es el *diodo de alto vacío*.

5.1 — Principios de funcionamiento. El diodo de alto vacío es una válvula de estructura muy simple, ya que no es otra cosa que la versión moderna de la lámpara de Edison provista de placa. Consiste, pues, en un cátodo caliente y una placa fría alojados en un bulbo en el que se ha practicado el vacío hasta el punto de poder despreciar los efectos de ionización del residuo de gas que inevitablemente queda. La Fig. 5 muestra los símbolos que se utilizan universalmente para representarlo en los esquemas de circuito, según que esté provisto, bien de cátodo de calentamiento directo (filamento), bien de cátodo de calentamiento indirecto.

Conocemos ya el funcionamiento elemental de esta válvula: El cátodo caliente emite electrones, los que son atraídos por la placa cuando es positiva con respecto a aquél; hay entonces corriente a través de la

válvula, cuyo sentido de circulación es el que *entra* a la válvula por la placa. En cambio, si la placa es negativa, rechaza a los electrones y no hay corriente alguna [1]; los electrones, después de una breve excursión, retornan al cátodo. El diodo, en esencia, es un dispositivo que se caracteriza por la propiedad de conducir en un solo sentido; los dispositivos de esta clase llevan el nombre genérico de *rectificadores*. Si entre el cátodo y la placa se aplica un voltaje alternado, el diodo conduce durante los semiciclos en que la placa es positiva y no conduce en los otros. La corriente pasa, pues, a través del diodo por *impulsos unidireccionales*: es una *corriente rectificada*.

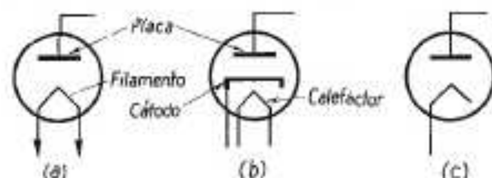


Fig. 5 — Símbolos usados para representar el diodo en los esquemas de circuito. a) Con cátodo de calentamiento directo (filamento). b) Con cátodo indirecto. c) General.

Esta simple relación cualitativa del comportamiento del diodo puede ser bastante para muchas cosas, pero así como no es suficiente para aprender a utilizar los resistores en los sistemas eléctricos saber que conducen corriente cuando se aplica una tensión entre los extremos, tampoco es suficiente saber que el diodo es un rectificador para poder aprovecharlo plenamente.

Cualquiera que sea el dispositivo o elemento de circuito de que se trate, el ingeniero y por lo tanto el técnico también, necesitan *saber* antes que nada qué relación existe entre la *tensión aplicada* a los *terminales* del elemento y la *corriente* que es su consecuencia.

Esta relación es muy sencilla en el caso de una resistencia: no es otra cosa que la ley de Ohm, de todos conocida:

$$I = \frac{E}{R}$$

es decir: la *corriente* I *que pasa a través de una resistencia es igual a la tensión o el voltaje aplicado* E *dividido por la resistencia* R. La tensión se mide en *volts*, la resistencia en *ohms* y la corriente en *amperes*.

La *relación volt-ampere*, es decir, la relación entre la tensión aplicada y la corriente resultante, se expresa, pues, en el caso de los resistores por medio de una simple fórmula. En el caso de las válvulas electrónicas no existe una fórmula equivalente: la relación volt- ampere de las válvulas electrónicas no puede expresarse por medio de una fórmula sencilla. Y para suplir a ésta es necesario expresar qué valor de corriente corresponde a cada valor de tensión: para 1 volt, 0,001 ampere, para 2 volts, 0,0015 ampere, etc. Hacerlo literalmente así sería muy incómodo; es mucho más práctico expresar esos pares de *valores* de tensión y de corriente por medio de una curva. Esa curva se llama *característica volt- ampere* del elemento, pero recibe nombres especiales en muchos casos, los que iremos aprendiendo poco a poco. Obsérvese

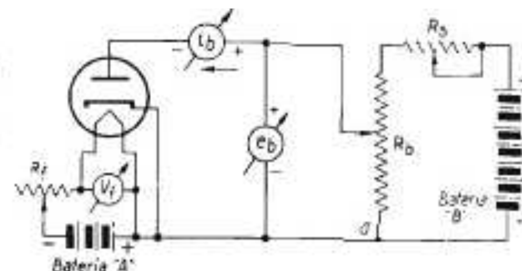
1 O hay una corriente muy pequeña por las razones que se dan más adelante.

que hay tres modos de expresar la relación volt-ampere: 1º) el lenguaje común, que puede condensarse en una tabla de valores; 2º) la curva característica; 3º) la fórmula. El lector, posiblemente se sienta mucho más feliz cuando se las tiene que ver con resistores, que cuando tiene que lidiar con una 6SK7. ¿No se le ha ocurrido pensar que eso se debe sólo a que para calcular resistencias le basta una simplísima fórmula, mientras que para discernir cómo debe usar una válvula necesita recurrir a tablas y curvas? La natural antipatía que muchos sienten por las fórmulas proviene, en gran parte, de no darnos cuenta de lo difícil que sería adquirir conocimientos técnicos útiles sin su precioso auxilio.

Veremos en seguida cómo puede determinarse la característica volt-ampere del diodo.

5.2 — Característica volt-ampere del diodo. Hay un método único para determinar la característica volt-ampere de un diodo y de cualquier otra válvula: es el que consiste en medir la corriente para unos cuantos valores diferentes de la tensión de placa, tantos como nos parezcan convenientes. Para ello necesitamos un montaje experimental muy sencillo, el que se muestra esquemáticamente en la Fig. 6 y que cualquiera puede seguramente realizar en su taller. ¿Por qué no hacerlo? La batería "A" suministra la *corriente* de calefacción; el resistor variable R_f y el voltímetro V_f permiten ajustar la tensión del calefactor en los valores deseados. La tensión de placa la suministra la batería "*B*", pero se la puede variar desde cero hasta el máximo de la batería por medio del *potenciómetro* R_b. Conviene agregar el resistor variable R_s (de resistencia unas 10 veces menor que R_b) para poder ajustar con más facilidad el valor de la tensión, el que se mide con el voltímetro e_b (¡fíjese en las polaridades indicadas!). El miliamperímetro i_b mide la corriente.

Fig. 6 — Montaje experimental para determinar la característica volt-ampere de un diodo. La resistencia R_f permite regular la tensión de calefacción. R_b permite ajustes gruesos y R_s ajustes finos de la tensión de placa. Las baterías pueden reemplazarse por otras fuentes adecuadas.



Se comienza por ajustar la tensión del calefactor en el valor nominal que corresponde al tipo de diodo; luego, a partir de la posición *O del* cursor de R_b se lo va desplazando hacia arriba, deteniéndolo, por ejemplo, en los puntos que corresponden a $e_b = 10$ volts, $e_b = 20$ volts, etcétera. El valor exacto se logra manipulando R_s. Para cada valor de e_b se lee y anota el correspondiente de i_b; con la mayoría de los diodos comunes no hay peligro en aplicar tensiones e_b de hasta 200 o más volts. A partir de la tabla de valores así confeccionada, se traza la *curva característica*. Para ello se comienza por tomar una hoja de papel

cuadriculado y dibujar sobre ella dos rectas en ángulo recto (véase la Fig. 7), una horizontal y otra vertical; marque con O el punto donde las dos rectas se cruzan; sobre la línea horizontal marque la *escala de volts*, como se ve en la figura; sobre la vertical, la *escala de miliamperes*. A cada par de valores de tensión y de corriente de su tabla corresponde un punto de su curva; para ubicarlo considere a los volts como la medida de la distancia del punto a la derecha de la línea Oi_b (*eje* la llaman los entendidos) y los miliamperes como la distancia arriba del eje Oe_b. El punto a, por ejemplo, está 10 volts a la derecha de Oi_b y a 14 mA (más o menos) arriba de Oe_b. Significa que en nuestra tabla, 10 mA es la corriente que tenemos anotada para 10 volts de tensión de placa. El punto b corresponde a 20 volts y 33 mA, y así sucesivamente. Cuando tenga todos sus puntos ubicados, haga pasar por ellos una curva trazada a pulso, que sea bien regular, con suaves inflexiones. Es posible que si se empeña en lograr una curva linda haciéndola pasar por *todos* los puntos le sea muy difícil: sea radical y deseche los puntos rebeldes. Por ejemplo, si en vez de haber marcado el punto e en la posición en que se muestra, le hubiera resultado en e', la curva presentaría allí una joroba de lo más antiestética. Correspondería entonces desechar el punto e. ¿Por qué? Porque lo más probable es que exista una equivocación al leer el valor de la corriente, o el instrumento tiene algún defecto. Precisamente una de las ventajas que la representación gráfica ofrece sobre las tablas de valores es la de mostrar esos errores. Otra ventaja es la de llenar automáticamente los huecos de la tabla; así, aunque usted *no* haya leído el valor de la corriente que corresponde a 25 volts, la curva *está diciendo* que ese valor es de 45 mA, porque el punto de ella que está a 25 volts de Oi_b está a 45 mA por arriba de Oe_b. Una ventaja más de la curva es la de ofrecerle una impresión de conjunto de las propiedades del aparato. Por eso muchas veces, aunque se tenga una fórmula disponible, se recurre a la representación gráfica para poder descubrir particularidades de interés. (Si el lector representa en la forma explicada los pares de valores de E y de I que da la ley de Ohm, encontrará que todos los puntos están sobre una recta que pasa por O. Si repite el trazado para otro valor de R, encontrará una recta semejante, pero de diferente inclinación. ¿Nunca lo ha hecho? Hágalo entonces y estamos seguros de que llegará a una conclusión, por lo menos, de mucho interés por lo que se refiere a la relación entre el valor de R y la *inclinación* de la recta).

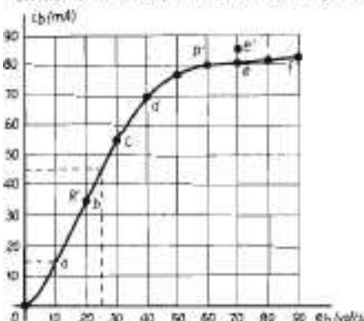


Fig. 7 – Característica volt-ampere de un diodo.

Al observar la característica volt-ampere del diodo notará que en ella se distinguen:

1) Una región casi recta (a b c d) que se llama *región lineal* de la característica.
2) Una porción ligeramente curvada Oa, que llamaremos *codo inferior*.

3) Una región muy curvada (de), que es el *codo superior*, y
4) Otra región casi recta (ef), *pero también casi horizontal*; es la *región de saturación*. La corriente más o menos constante (80 mA en este caso) que corresponde a esta condición se llama *corriente de saturación*.

La instalación de la Fig. 6 permite repetir el experimento variando las condiciones, por ejemplo, con otros valores de la tensión del calefactor. La Fig. 8 muestra las curvas que resultan con tensión del calefactor menor y mayor que la normal, comparadas con la que corresponde a la tensión normal. Obsérvese que el efecto más evidente de variar la tensión del calefactor (lo que es lo mismo que variar la temperatura del cátodo) es el de modificar las posiciones del codo superior y de la región de saturación con respecto a las rectas Oe_b y Oi_b. Por lo demás, las curvas conservan el mismo aspecto general y las porciones inferiores de las mismas coinciden exactamente.

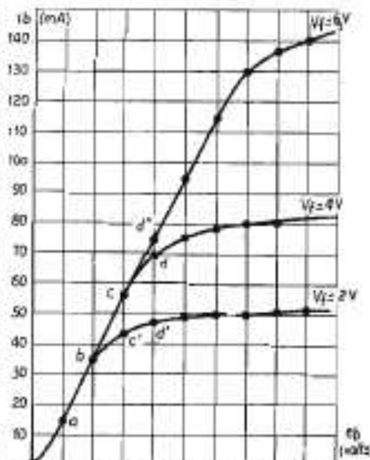


Fig. 8 – Características volt-ampere de un diodo para diferentes tensiones de calefacción.

En el párrafo siguiente se explica por qué. Léalo si siente bastante curiosidad solamente; no es esencial.

*** 5.3 — Explicación de la forma de las características volt-ampere del diodo.** Para explicar la forma peculiar de las características volt-ampere del diodo consideremos la representación de la Fig. 9, donde la forma alargada que se da al tubo no tiene más objeto que hacer claro el diagrama. Supongamos que la temperatura del cátodo es muy baja, de modo que escapan de él muy pocos electrones, digamos uno cada segundo. Consideremos uno de ellos, Fig. 9 (a). Sobre éste actúan dos fuerzas, representadas en la figura por las dos flechitas opuestas; una de éstas es la

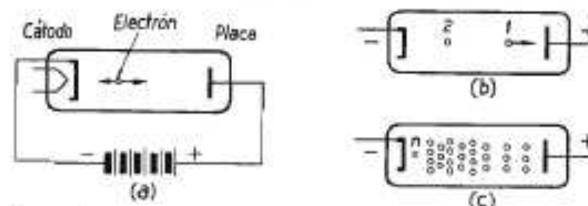


Fig. 9 – Efecto de la carga espacial en el diodo (ver el texto).

fuerza de atracción del cátodo, que tiende a hacer volver al electrón; sabemos que esa fuerza es muy grande en la inmediata vecindad de la superficie catódica y disminuye rápidamente a poco que el electrón se aleje de ésta. La otra fuerza es la de atracción de la placa, la que en primera aproximación puede considerarse independiente de la posición del electrón[1]. En consecuencia, si en virtud de su ener-

1 Esta hipótesis está plenamente justificada cuando se considera que cátodo y placa son superficies planas y paralelas.

gia térmica consigue el electrón apartarse algo del cátodo, la atracción de la placa domina y la partícula se encamina hacia la placa. Como la ecuación de Richardson y Dushman da el número de electrones o, mejor dicho, la corriente equivalente, que logran apartarse por sí mismos a una distancia del cátodo como para que la fuerza de retorno sea despreciable, ocurre que tantos electrones llegan a la placa como salen del cátodo.

Pero supongamos que se aumenta la temperatura: la emisión crece (hay más electrones escapados por segundo) y se dará el caso de que antes que el primer electrón sea captado por la placa, un segundo se halla en camino Fig. 9 (b). La situación de este segundo electrón es más complicada, puesto que sobre él, aparte de las dos fuerzas ya indicadas, obra *la de repulsión del primer electrón*. Es evidente que ésta ayuda a la que ejerce el cátodo y que la fuerza neta que impulsa la partícula hacia la placa es menor que en el primer caso.

A un posterior aumento de la temperatura corresponde la situación que muestra la Fig. 9 (c). El último electrón escapado, *n*, sufre la repulsión de todos los que le precedieron y se hallan en camino hacia la placa en el momento de ser emitido. Esta fuerza puede ser tan grande como la de placa: en tal caso el electrón *n* es frenado y obligado a retornar al cátodo, por decirlo así, con el rabo entre las piernas.

Con un poco de imaginación usted comprenderá que, con temperatura suficientemente alta, el número de electrones que se hallan en viaje hacia la placa queda constante; en cuanto uno de ellos "entra" en la placa, otro se incorpora a la cola. Ese chorro de electrones que se mueven del cátodo a la placa puede compararse a las escaleras mecánicas del subterráneo: cuando hay pocos pasajeros, la escalera los eleva a todos a medida que se presentan y el número de pasajeros que llegan arriba es exactamente igual al de los que alcanzan el primer peldaño, y crece en la misma medida que éste. Pero cuando la afluencia de pasajeros es demasiado grande, el número que llega arriba depende solamente del ancho de la escalera y de la velocidad con que se desplaza; los demás no pueden incorporarse a la "corriente" de pasajeros y se quedan esperando al pie de la misma. Supongamos que usted y un amigo se colocan uno al pie y otro en la desembocadura de la escalera. El primero lleva la cuenta de la cantidad de pasajeros por minuto que llegan al pie; el segundo, la cantidad que en el mismo intervalo llegan arriba. Al comparar sus anotaciones

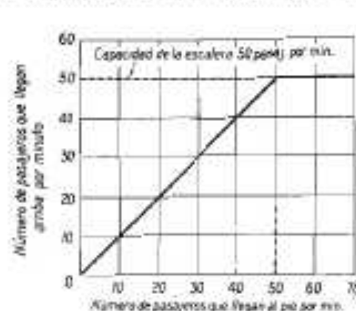


Fig. 10 – Característica "pasajeros que llegan al pie – pasajeros que llegan arriba" de una escalera mecánica.

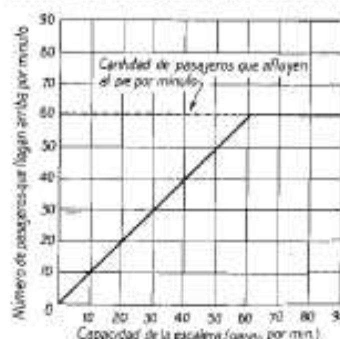


Fig. 11 – Característica "capacidad de la escalera – corriente de pasajeros" de la escalera mecánica.

podrán formar una tabla y trazar una curva como la que muestra la Fig. 10: al principio, cuando la afluencia de pasajeros es pequeña, todos suben y todos llegan, pero como se supone que la capacidad de la escalera es de 50 pasajeros por minuto, cuando la afluencia excede de este número, la cantidad de pasajeros transportados deja de crecer. Diremos que la escalera está *saturada*, que es una manera elegante de decir que no da más. Exactamente lo mismo ocurre dentro de la válvula cuando el número de electrones emitidos va aumentando. Y lo curioso, que tiene sus ribetes filosóficos, es que los electrones se mueven tan desordenadamente y son tan poco respetuosos de la integridad física de sus semejantes como algunos de los pasajeros con quienes compartimos los servicios públicos de transporte...

La escalera nos servirá para otra experiencia, suponiendo que usted tenga amigos de influencia en las empresas de subterráneos. La *capacidad de transporte* de la escalera depende de su ancho y de la velocidad con que avanza. Para un ancho dado y si se supone que los pasajeros no usan sus piernas sino para alcanzar el primer peldaño, la capacidad es directamente proporcional a la velocidad del avance. Supongamos que usted toma el control de la escalera en un momento en que los pasajeros afluyen a razón de 60 por minuto y que va variando la velocidad desde cero (capacidad nula), aumentándola hasta llegar a la que corresponde a la velocidad de 90 pasajeros por minuto. El número de pasajeros que llegan arriba por minuto varía, fácil es comprenderlo, como lo muestra la Fig. 11: es decir, crece al principio en forma directamente proporcional a la capacidad (o sea a la velocidad) de la escalera, pero no puede exceder de la cifra de la afluencia al pie (60 pasajeros por minuto). La característica volt-ampere del diodo (Fig. 7) representa un fenómeno semejante. La capacidad de conducción de corriente del diodo depende de la tensión es de la placa, por una parte, porque los electrones urgidos por una fuerza creciente, se mueven con mayor velocidad al aumentar la tensión; por la otra, porque la mayor atracción de la placa permite el adensamiento de la muchedumbre de electrones que se hallan en viaje antes de que el efecto de repulsión sobre los recién llegados comience a dominar. Por lo tanto, si a partir del valor cero se comienza a aumentar la tensión, la corriente de placa aumenta, pero el aumento está limitado por la cifra que corresponde a la emisión del cátodo para la temperatura que se elija. Modificar la temperatura del cátodo, equivale a modificar la afluencia de pasajeros de la escalera: la *saturación* se produce siempre, pero a diferentes valores, tal como se ve en la Fig. 8.

Las curvas de la Fig. 8 exhiben sinuosidades (los codos) que nuestra imagen no explica; se deben a efectos secundarios del fenómeno y no creemos oportuno explicarlos aquí porque no tienen mayor importancia práctica. Lo importante es captar la esencia del fenómeno con la claridad necesaria para que usted pueda *imaginarse* lo que ocurre en realidad. Perfeccionar la idea, pulirla y adornarla con fórmulas es después menos difícil de lo que se cree.

Hay, sin embargo, un detalle importante: si se realiza la experiencia de la Fig. 6 cuidadosamente, utilizando instrumentos muy sensibles, se encontrará que la corriente no es nula cuando se anula la tensión aplicada entre la placa y el cátodo. No. Se podrá observar una corriente de algunos microamperes. Esto se explica fácilmente: algunos electrones tienen más energía que la estrictamente necesaria para abandonar el cátodo, la suficiente como para alcanzar la placa sin necesidad de ayuda externa. En la escalera, los individuos de mandíbula prominente y las niñas imprudentes no se resignan a quedarse parados en el peldaño y avanzan por sus propios medios; la llegada de pasajeros a la desembocadura no es nula aunque la escalera esté parada. Recuerde que se necesita aplicar a la placa una tensión negativa del orden de un volt para reducir estrictamente a cero la corriente. A esta conducción sin tensión contribuye otro fenómeno: el de los potenciales de contacto. Cuando dos metales, por ejemplo cobre y cinc, se ponen en contacto, entre ellos aparece una diferencia de potencial; las *cuplas termoeléctricas*, que usted seguramente conoce, se basan en este principio. Si se sigue el circuito desde el cátodo a la placa de un diodo se encuentra una cadena de metales diferentes puestos en contacto; el resultado es que eliminando la batería (¡pero cerrando el circuito!) la placa queda ligeramente positiva con respecto al cátodo (algunos décimos de volt), lo cual ayuda al efecto de la velocidad inicial de los electrones.

*** 5.4 — Diodos con carga.** El diodo no sirve solamente para realizar experiencias entretenidas y dar pretexto para filosofar sobre las escaleras mecánicas. Encender el filamento y disponer una batería entre cátodo y placa no conduce a nada práctico más que adquirir el conocimiento de algunas propiedades del tubo. Cualquier circuito de *utilización* del diodo debe incluir un elemento o un dispositivo en el cual se espera provocar efectos determinados aprovechando las propiedades del mismo. Ese elemento es lo que se llama *carga*, en general, del circuito.

El de la Fig. 12 es el circuito de utilización más elemental. No sirve en realidad de mucho, pero ayuda a explicar lo que pasa en casos más complicados. El *circuito de placa* (es decir, el que va del cátodo a la placa) contiene una batería de voltaje conocido, *en serie* con la *carga*, constituida ésta por el resistor R_s, de resistencia también conocida. El problema que nos proponemos resolver consiste en "adivinar" qué corriente circularía por R_s y el diodo si se realizara prácticamente la instalación.

¿Fácil, no? Sí, sería fácil si conociéramos el voltaje e_b que se presentará entre placa y cátodo, pero no lo conocemos; lo único que sabemos es que el voltaje va a *ser* menor que E_{bb}, porque al circular corriente por R_b hay una *caída de potencial* en el resistor. El punto *a* está a E_{bb} volts positivos con respecto al punto *O*, a causa de la batería. Entre el punto *a* y el punto *b* hay una caída de potencial que, según la ley de Ohm, debe ser

$$e_R = R_b \times i_b \qquad (1)$$

Por lo tanto, al pasar de *O* a *b*, el potencial sube primero en la cantidad E_{bb} y baja después en la cantidad e_R. El potencial de *b* no es otra cosa que el voltaje o la tensión e_b que buscamos. ¿Cuántos volts? No lo sabemos, pero sí estamos seguros que podría calcularse con la fórmula,

$$e_b = E_{bb} - e_R \qquad (2)$$

es decir, con esta otra

$$e_b = E_{bb} - R_b \times i_b \qquad (3)$$

si conociéramos la corriente i_b.

Para aclarar la dependencia que existe entre e_b y i_b podremos trazar el gráfico de la ecuación (3), dando una serie de valores a i_b y determinando los correspondientes de e_b, confeccionando una tabla de valores y pasando después al papel cuadriculado. Supongamos que sea

$$E_{bb} = 100 \text{ volts y } R_b = 2000 \text{ ohms}$$

Dos pares de valores se determinan fácilmente: Para $i_b = 0$ resulta $e_b = E_{bb}$ y para $i_b = 0.050$ amp $\left(= \frac{E_{bb}}{R_b} = \frac{100}{2000}\right)$, e_b resulta ser cero. En el papel cuadriculado (Fig. 13) a estos pares de valores corresponden los puntos *A* ($i_b = 0$, $e_b = 100$) y *B* ($e_b = 0$, $i_b = 50$ mA). Si usted quiere buscar otros puntos hágalo; nuestra experiencia nos enseña que es inútil, porque las curvas representativas de ecuaciones como la (3) nos han resultado siempre rectas, y para trazar éstas basta con conocer dos de sus puntos.

Ya que no conocemos qué valor va a tener i_b, ¿por qué no hacer ensayos? Cuando usted busca una tuerca para un tornillo sin conocer la medida de éste, puede resolver el problema por dos métodos: el "científico", de medir el diámetro de la rosca, contar el número de hilos por pulgada e ir a la gaveta de las tuercas correspondientes; y el "práctico" (¡estamos seguros de que lo prefiere!), que consiste en

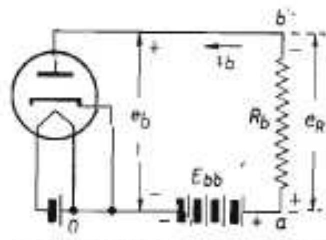


Fig. 12 – Circuito de utilización básico del diodo. R_b es la carga.

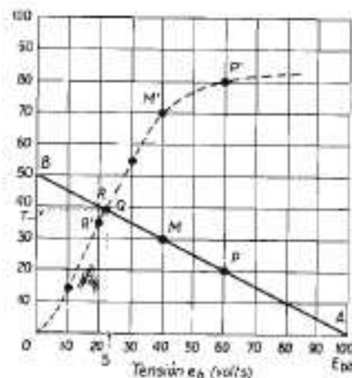


Fig. 13 – Línea de carga del diodo de la Fig. 12 (recta A-B). La curva de puntos es la característica volt-ampere del diodo.

probar tuercas que "a ojo" parezcan adecuadas, hasta dar con la conveniente. Este método de ensayos sucesivos es muchas veces el que conduce a resultados buenos; pero además ocurre que suele enseñarnos el camino a seguir para la solución "científica". Cualquier profesional sincero le confirmará que las soluciones prácticas existieron casi siempre antes que las teóricas. Supongamos entonces que i_b sea de 20 mA. Según el gráfico de la Fig. 13 (punto *P*), a $i_b = 20$ mA corresponde $e_b = 60$ volts. Veamos cómo anda este valor con el diodo. La Fig. 7 nos dice que cuando en el diodo es $e_b = 60$ volts, la corriente alcanza a 80 mA. Estamos errados, porque la resistencia quiere un valor de corriente y el diodo exige otro. Probemos con $i_b = 30$ mA; la Fig. 13 nos da (punto *M*) $e_b = 40$ volts, pero la Fig. 7 da para esta tensión $i_b = 70$ mA. Mejor que antes, pero malo todavía. Hagamos $i_b = 40$ mA; en la Fig. 13 resulta $e_b = 20$ volts y en la Fig. 7, $i_b = 35$ mA. Ya estamos cerca. Como se ve, el procedimiento es laborioso; pero se nos ocurre un medio para evitar el pasar de una figura a otra a cada ensayo: Copiemos la curva de la Fig. 7 en la 13, tal como se muestra con línea de trazos en ésta. ¡Hemos hallado la solución científica! En efecto, los valores de corriente y de tensión que corresponden al punto Q, donde la curva característica del diodo y la recta *AB* se cruzan, satisfacen el problema. Es fácil darse cuenta de que es así, porque ese par de valores satisface, por una parte, las exigencias de la resistencia por encontrarse el punto Q sobre la recta *AB*, y por la otra las del diodo, porque ese punto está también sobre la característica volt-ampere del diodo. Es *A* el único punto que cumple esas condiciones; representa, pues, la única solución del problema.

Es necesario que usted comprenda perfectamente lo que hemos hecho si quiere tener ideas claras acerca del funcionamiento de los tubos electrónicos en los circuitos. Conviene que resuelva el siguiente problema:

PROBLEMA. Las curvas características del diodo de la Fig. 12 son las que se dan en la Fig. 7. Suponiendo que $E_{bb} = 80$ volts y $R_b = 1000$ ohms, determinar: *a*) la corriente i_b que circula en el circuito; *b*) la tensión de placa e_b; *c*) la caída de tensión en el resistor R_b. Repita el ejercicio, primero dejando E_{bb} constante y modificando R_b; segundo, dejando R_b constante y modificando E_{bb}. Haga tablas de valores y, en el segundo caso, represente gráficamente i_b para diferentes valores de E_{bb} (R_b constante). La curva que resulta es la *característica dinámica del diodo en ese circuito.*

La recta *AB se llama línea de carga* del circuito. Observe que la *inclinación* de la recta depende de R_b, y su posición de E_{bb}. La distancia *OS* representa la tensión de placa e_b que resulta. La distancia *SA*, la caída de tensión e_R en la resistencia. Observe que

$$\overline{OA} = \overline{OS} + \overline{SA}$$

que es lo mismo que decir

$$E_{bb} = e_b + e_R$$

5.5 — Aplicaciones del diodo. Rectificadores. La principal aplicación del diodo aprovecha su propiedad *rectificadora*, es decir, la de dejar pasar corriente en un solo sentido. Si en la Fig. 12 reemplazamos la batería por un generador de tensión alternada obtenemos el circuito

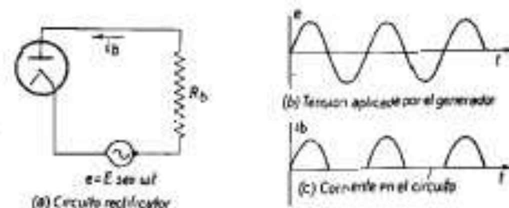


Fig. 14 – El diodo como rectificador.

rectificador de la Fig. 14 (a). Aquí la función de la tensión fija E_{bb}, está reemplazada por la de la tensión alternativa *e*, la que varía con el tiempo, como lo muestra la Fig. 14 (b). Si usted tiene frescos sus conocimientos sobre corriente alterna no hallará dificultad en interpretar el funcionamiento de este circuito. La corriente circula solamente durante los semiciclos de la tensión aplicada en que la placa es positiva

con respecto al cátodo; circula entonces como una sucesión de impulsos, siempre en el mismo sentido. Si no existiera el diodo, la corriente invertiría también su sentido siguiendo las inversiones de la tensión. El diodo nos permite, pues, obtener una corriente *unidireccional* con una fuente de tensión alternativa.

La corriente pulsatoria unidireccional se transforma en *corriente continua pura* por medio *de filtros*, cuyo estudio no corresponde a este texto.

La **Fig.** 15 representa dos circuitos rectificadores típicos. El primero no es más que la versión práctica del que acabamos de ver. La tensión a rectificar se aplica por medio de un transformador y se muestra también cómo, por medio de otro transformador, se logra la corriente de calefacción del filamento. La *carga* se conecta entre los puntos — y +. ¿Por qué el *polo positivo* de un rectificador es el cátodo del diodo? Porque la corriente rectificada entra por la placa y sale por el cátodo; éste

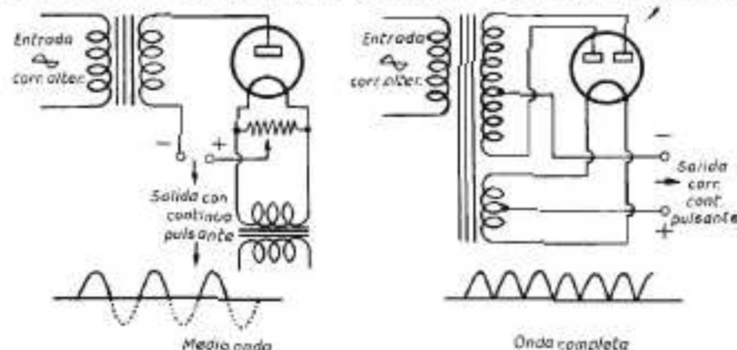


Fig. 15 — Rectificadores de media onda y de onda completa

es el polo positivo, del mismo modo que en una batería lo es el terminal por el cual sale la corriente. Este rectificador, lo mismo que el de la Fig. 14, se llama de "media onda", porque la corriente fluye sólo durante la mitad de cada ondulación completa de la tensión.

El segundo rectificador de la Fig. 15 es un rectificador de *onda completa*. Observe que se utiliza en él un "doble diodo", es decir, una válvula con un cátodo y *dos* placas. En realidad, si usted observa una válvula de esta clase verá que se trata de dos diodos encerrados en la misma ampolla. El transformador que alimenta el circuito de placa (transformador de alta tensión) tiene un secundario con punto medio. Por la propiedad de balanceo de estos transformadores, cuando una de las placas es positiva con respecto al punto medio, la otra es negativa. Como la polaridad de la tensión alterna cambia cada medio ciclo, siempre hay una de las placas con tensión positiva con respecto al punto medio del transformador; y dado que éste está en definitiva unido al cátodo a través de la carga, resulta que durante un medio ciclo conduce una de las placas y durante el otro medio ciclo conduce la otra. Las dos placas cierran su circuito sobre la misma carga, las dos conducciones se suceden, en consecuencia, en la carga, una a continuación de la

otra, tal como se ve en la figura. Por haber conducción durante la ondulación completa, este circuito constituye un rectificador de onda completa.

Hay mucho que decir acerca de los rectificadores, pero nos hemos propuesto ceñirnos a lo esencial, y lo dejaremos para otra oportunidad.

* **5.6 — Voltímetros a válvula.** La Fig. 16 representa el esquema básico de un *voltímetro a válvula*, mejor dicho a diodo. Se observa que no es sino un rectificador en el cual se ha instalado un miliamperímetro (mejor un microamperímetro) en serie. Cuando se aplica una tensión alternada entre los terminales *a* y *b*, por el circuito fluye una corriente pulsatoria, tal como ocurre en el rectificador común. El miliamperímetro, que se supone ser del *tipo* de corriente continua, mide esa corriente. Dado que su sistema *móvil* tiene cierta inercia (es decir, opone resistencia a los cambios bruscos de posición), la aguja no sigue fielmente las variaciones pulsantes de la corriente sino que se queda en una posición intermedia entre la que corresponde al reposo y la que correspondería al valor máximo de los impulsos de corriente. Con más propiedad, la deflexión del instrumento queda determinada por el *valor medio* de los semiciclos positivos de la onda de corriente. Cuando la resistencia *R* es bastante grande, los resultados del *Problema* del párrafo 5.4 demuestran que la corriente es prácticamente proporcional a la tensión aplicada; la deflexión del instrumento será, pues, proporcional al *valor medio* de la tensión aplicada entre los terminales *ab* de la Fig. 16. El aparato constituye así un *voltímetro de valor medio.*

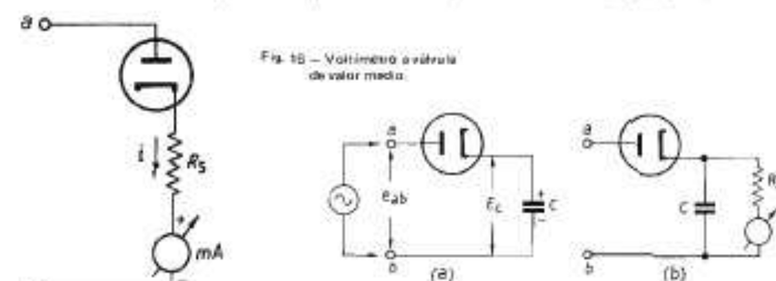


Fig. 16 — Voltímetro a válvula de valor medio

Fig. 17 — Voltímetro a válvula de valor de pico

La Fig. 17 (a) ilustra el principio de funcionamiento del *voltímetro de pico*. El capacitor C está inicialmente descargado. Al aplicarse una tensión alterna entre *a* y *b*, el primer semiciclo positivo hace que la placa se torne positiva con respecto al cátodo y el tubo conduzca. La corriente de conducción *carga* el capacitor con la polaridad que muestra la figura, la cual tiende a hacer positivo el cátodo con respecto a la placa; en consecuencia, la conducción cesa en el momento en que la tensión aplicada e_{ab}, comenzando a disminuir, se iguala a la tensión alcanzada por el capacitor, tal como se muestra en la Fig. 18. Durante el resto del semiciclo positivo y durante el semiciclo negativo, la tensión del capacitor no varía porque no puede descargarse. Cerca del tope del siguiente semiciclo positivo, la tensión e_{ab} vuelve a ser mayor que la del capacitor, de modo que aparece otro breve periodo de conducción que eleva aun más la tensión del capacitor. Se comprende así que en pocos ciclos el capacitor se ha cargado a una tensión equivalente al *valor de pico* de la onda aplicada y que una vez alcanzada esta condición no hay ya posibilidad de conducción hasta tanto no se modifique la amplitud de e_{ab}. Nos resta ahora sólo medir la tensión de carga del capacitor, y ello se puede hacer por medio de un voltímetro de corriente continua de *alta resistencia interna*, conectado como muestra la Fig. 17 (b). El agregado del voltímetro modifica *algo* el funcionamiento descripto, pues ahora el capacitor tiene un camino para descargarse una vez cesado cada periodo de conducción: la descarga debe suplirse por un corto periodo de conducción en la cima de cada semiciclo positivo; la importancia de este periodo es tanto menor cuanto mayor sea el producto $C \times R$, comparado con el periodo T de la tensión que se mide, puesto que a mayor valor del producto, menor resulta la caída de tensión durante los periodos de descarga.

Si se hace, por ejemplo, $C = 0.05$ microfarad $= 0{,}005 \times 10^{-6}$ farad y $R_s = 1$ megohm $= 10^6$ ohm, se tiene $C \times R_s = 0{,}05 \times 10^{-6} = 0.05$ farad $\times$ ohm $= 0.05$ segundo; el instrumento es entonces adecuado para utilizarlo con frecuencias tan bajas como de 100 ciclos por segundo ($T = 1 \div 100 = 0.01$ por segundo).

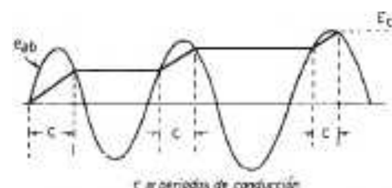


Fig. 18 – Cómo varía la carga del capacitor en la Fig. 17. e_{ab} es la tensión alterna aplicada entre los terminales a y b de la Fig. 17 (a). E_c es la tensión de carga del capacitor.

Los voltímetros de válvula son muy importantes en radio, porque son prácticamente los únicos que pueden utilizarse para la medición de tensiones de alta frecuencia. En la práctica, los circuitos descriptos se complementan para obtener determinadas cualidades, hasta el punto de que a veces resulta difícil reconocerlos.

6. EL TRIODO

El primer tubo realmente fecundo en aplicaciones, tanto cronológicamente como por su simplicidad, es el *triodo*. El triodo se puede considerar como un diodo al que se agrega un tercer electrodo, interpuesto entre la fuente emisora de electrones, o cátodo, y el ánodo, o placa. El nuevo electrodo adopta, por lo general, la forma de un fino alambre arrollado en forma de hélice cilíndrica alrededor del cátodo,

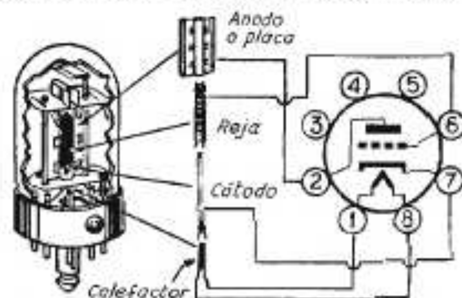


Fig. 19 – Construcción del triodo.

pero aislado de él y guardando cierta distancia; otras disposiciones son igualmente posibles. Recibe los nombres de *electrodo de control, reja* y *grilla,* indistintamente.

La Fig. 19 muestra diagramáticamente el montaje interior del triodo. La Fig. 20, y la misma Fig. 19, los símbolos con que se lo representa en los esquemas de circuito.

6.1 — Funcionamiento del triodo. Para entender cómo funciona el triodo conviene recordar que, según se ha visto en el capítulo precedente, la corriente del diodo queda determinada por una condición de equilibrio entre el efecto de atracción de la placa y el de repulsión de la carga de espacio, es decir, de la carga de los electrones que en un momento dado ocupan, en su movimiento, el espacio comprendido entre el cátodo y la placa.

La reja, geométricamente considerada, no representa un obstáculo im-

portante para el movimiento de los electrones a causa de su construcción abierta. Su decisiva función controladora nace de la posibilidad de aplicarle potenciales positivos o negativos con respecto al cátodo por medio de una batería externa.

Si la reja se hace negativa respecto del cátodo, su carga ayuda el efecto de repulsión de la carga de espacio, puesto que ambas son del mismo signo. En consecuencia, si en ausencia de la reja la condición de equilibrio se producía, digamos, para una concentración de 100.000 electrones por milímetro cúbico, ahora la misma condición se alcanzará con sólo, por ejemplo, 25.000 electrones por milímetro cúbico. La corriente se reduce así, presuntivamente, a la cuarta parte. Elevando aun más el potencial negativo de la reja, la concentración disminuye más aún; como caso límite, la concentración puede llegar a ser nula cuando la reja es suficientemente negativa como para neutralizar por sí sola la acción de la placa. El potencial negativo de reja que es justamente suficiente para impedir la circulación de electrones se llama *tensión de corte* del triodo; es fácil darse cuenta que la tensión de corte depende no sólo de la estructura geométrica de la válvula sino también del potencial de la placa: cuanto más positiva sea la placa, tanto más negativa deberá hacerse la reja para interrumpir la corriente.

Fig. 20 – Símbolos utilizados para representar el triodo en los esquemas de circuito. a) De calefacción indirecta, b) De calefacción directa, c) General



Por el contrario, la reja positiva ayuda la acción de la placa al demandar una mayor concentración de electrones para establecer la condición de equilibrio.

De este modo, y suponiendo que la temperatura del cátodo se mantenga constante, la corriente de placa del triodo viene a depender no sólo del voltaje de la placa respecto del cátodo sino también del voltaje de la reja con respecto al mismo electrodo.

Ahora bien, si la reja se mantiene negativa respecto del cátodo, *ella no capta por sí misma electrones,* ya que su carga negativa ejerce una acción repulsiva eficaz sobre los electrones que se le aproximan demasiado. Por lo tanto, no hay entonces *corriente de reja,* lo que significa que la batería o fuente de tensión cualquiera que se utilice para fijar su potencial, *no entrega corriente.* Y al no entregar corriente, tal fuente puede considerarse *en circuito abierto. No se gasta entonces ninguna energía al mantener negativa la reja,* y basta con modificar su potencial para gobernar a voluntad la corriente de placa. En cambio, la reja positiva es capaz de absorber electrones, y en tal caso existirá alguna corriente de reja y, por lo tanto, consumo de energía en su circuito. Sin embargo, siempre que el potencial positivo de la reja se mantenga *por debajo* del potencial de la placa, la corriente de reja se mantendrá mucho menor que la de placa. La energía gastada en el circuito de reja será, por lo mismo, mucho menor que la que se pone en juego en el circuito de placa.

De esta posibilidad de controlar corrientes (y, por lo tanto, poten-

cias) considerables en un circuito sin gasto de energía en el dispositivo controlador, hacen muchas de las importantes aplicaciones del triodo. A ella hay que agregar la extraordinaria rapidez con que la corriente de placa obedece a las variaciones de potencial de la reja. Posiblemente no transcurre un intervalo superior al cienmillonésimo de segundo entre el instante en que se modifica el potencial de reja y el instante en que la corriente de placa se acomoda a su nuevo valor. No existe dispositivo alguno construido por el hombre que pueda compararse en este sentido con el tubo electrónico.

6.2 — Características volt-ampere del triodo. Como en el caso del diodo, no conocemos una fórmula que exprese con bastante exactitud la relación que vincula la corriente de placa del triodo con los voltajes de reja y de placa. Debemos recurrir nuevamente al trazado de las características volt-ampere experimentales. A este propósito sirve la instalación de la Fig. 21, que no es más que una extensión de la que

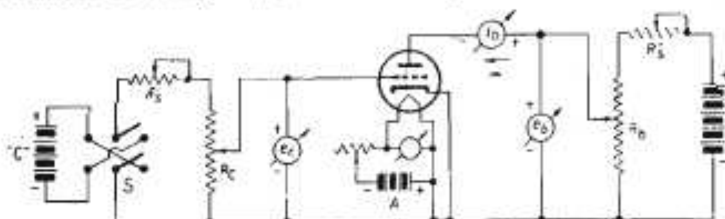


Fig. 21 — Montaje para determinar las características volt-ampere del triodo.

nos sirvió para el caso del diodo. Se ha agregado un dispositivo potenciométrico para obtener la tensión de reja, semejante al que empleamos en el circuito de placa, pero donde una *llave inversora, S,* permite invertir la polaridad de la batería.

Dado que ahora son *dos* las tensiones que podemos variar, es necesario proceder con cierto método para evitar confundir los datos a obtenerse de la experiencia. Lo mejor es fijar una de las tensiones, por ejemplo, la de placa, e_b, en un valor elegido de antemano e ir variando después, paso a paso, la tensión de reja, digamos de volt en volt. Se registran los valores de corriente de placa que corresponden a cada valor de la tensión de reja. Los pares de valores obtenidos se ubican sobre un papel cuadriculado en la forma que ya conocemos y se unen por medio de la consabida *curva de inflexiones suaves.* A continuación se cambia el valor de la tensión de placa a otro valor elegido, y se repite el mismo proceso. Una nueva curva resulta; la dibujaremos y, para evitar confundirla con la anterior, anotamos sobre ambas el valor de la tensión de placa al que cada una corresponde. A otros valores de la tensión de placa corresponden, de igual modo, otras curvas, así que trazándolas todas referidas a los mismos ejes, se obtiene lo que se llama una "familia de curvas". Como cada curva representa la relación que existe entre la tensión de reja y la corriente de placa, con la tensión de placa constante, esta familia se llamará *característica tensión de reja-corriente de placa* o *característica de tensión de placa constante.* También se la suele llamar *característica de reja* o *característica mutua.* Más convenientes son

las dos primeras denominaciones, porque son más descriptivas. La Fig. 22 representa una de estas familias de curvas, la que corresponde al triodo 6J5.

Pero existe otro método para presentar la información obtenida en la experiencia anterior. Basta extraer de nuestra tabla los diferentes pares de valores de corriente de placa que corresponden a una misma tensión de reja. Para cada valor de ésta se podrá trazar entonces una curva, *característica tensión de placa-corriente de placa,* individualizada por el valor de la tensión de reja correspondiente. Estas curvas se llaman también *característica de tensión de reja constante* o *característica de placa.* Se las puede obtener más directamente con la instalación de la Fig. 21, fijando e_c en valores elegidos de antemano y procediendo a variar e_b y leer los valores de i_b correspondientes.

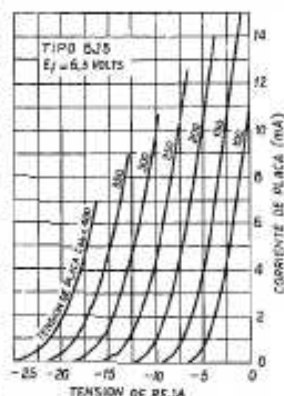


Fig. 22 — Características tensión de reja — corriente de placa del triodo 6J5 (características mutuas).

La Fig. 23 representa las características de placa del triodo 6J5. Es fácil verificar la equivalencia de ambas formas de representación.

¿Cuál de las dos formas de representación es la más conveniente? Hemos de comprobar dentro de poco que las curvas de placa son más adecuadas para la resolución de los problemas más frecuentes en las aplicaciones del triodo [1].

Las curvas características se suministran en los manuales de válvulas. En éstos se las llama *características medias.* El nombre indica que no corresponden en realidad a un ejemplar determinado del tipo a que

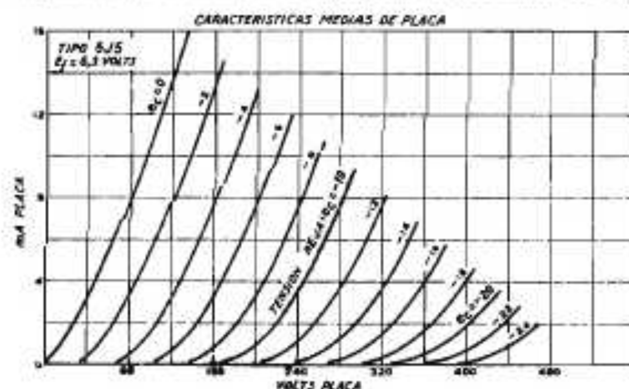


Fig. 23 — Características tensión de placa — corriente de placa del triodo 6J5 (Características de placa).

1 Existe una tercera forma de representación de las características del triodo, que se emplea en relación a las válvulas de gran potencia y es conveniente para el cálculo de amplificadora clase C". Se trazan representando los pares de valores de e_b y e_c a los que corresponde una misma corriente de placa. Son, pues, las características de corriente de placa constante.

se refieren, sino que representan valores promediados en las mediciones ejecutadas sobre un gran número de ejemplares del mismo tipo. Es necesario y conveniente hacerlo así porque entre una 6J5 y otra 6J5, por ejemplo, hay diferencias notables aunque provengan de la misma fábrica, diferencias que derivan de las inevitables tolerancias que necesitan admitirse en las dimensiones, calidades de material, etc., para la producción en serie. Estas tolerancias son a veces mucho más amplias de lo que se sospecha y deben tenerse en cuenta al proyectar y construir equipos: éstos deben funcionar bien cuando sus válvulas se toman al azar entre las dadas por "buenas" por el departamento de control del material de su fábrica.

Cuando la válvula de que se trata funciona en condiciones tales que la reja llega a ser por momentos positiva, la información debe complementarse expresando las relaciones que vinculan la corriente de reja con las tensiones de placa y de reja. Se obtienen así las *características tensión de placa-corriente de reja* o *las características tensión de reja-corriente de reja.*

Corresponde finalmente observar en las Figs. 22 y 23 que la forma general de las curvas del triodo con reja negativa son semejantes, en general, a la del diodo [1]. No puede ser de otro modo, ya que la presencia de la reja negativa no hace sino alterar el efecto de la carga de espacio, sin modificar en su esencia la condición de equilibrio que determina el valor de la corriente. Cuando la reja es positiva hay, en cambio, modificaciones mayores que no consideraremos aquí.

6.3 — Factores variacionales (o diferenciales) del triodo. El principiante (y, podemos decirlo, también el técnico avezado) suele confesar su confusión ante el número exorbitante de tipos de válvulas diferentes que encuentra en el mercado. A nosotros nos ocurre lo mismo. Sin duda, el desarrollo velocísimo de la técnica electrónica y la lentitud y la natural inercia con que se han establecido normas de aceptación general, y también los intereses puramente comerciales, han llevado a una situación en la que por lo menos el 90 % de los tipos de válvulas actuales podrían desecharse sin ninguna clase de remordimientos. El otro 10 % habrá que conservarlo. Una razón para que haya tipos diferentes son los métodos para suministrar la energía de calefacción del cátodo, cuya conveniencia depende del destino del equipo en que se usen las válvulas. Otra, más importante, es la aptitud de cada tipo para desempeñar funciones determinadas, tales como las de amplificadoras, conversoras, osciladoras, detectoras, etc. También de primera importancia es la capacidad de manejar potencias, tensiones y corrientes, de una amplia escala de grandores. Este aspecto está directamente vinculado con el tamaño físico del tubo. En cambio, la "aptitud para la función" depende de detalles menos evidentes. Hay que buscar éstos en las *características* que acabamos de estudiar.

La comparación directa de las curvas de diferentes tipos es incómoda y poco práctica. Nos llevaría a describir las propiedades comparadas de cada una diciendo, por ejemplo, "las curvas de placas de la 6J5, son más inclinadas (más próximas a la vertical) que las de la 6C8, y están además más juntas una de otra". Tal vez, al fin y al cabo, estas observaciones son las más importantes para juzgar las aptitudes funcionales de cada tipo, ya que la forma general de las curvas es la misma.

1 En las Figs. 22 y 23 no se observa la región de saturación. Ello se debe simplemente, a que no se la ha alcanzado en el desarrollo de la experiencia. La región de saturación no tiene importancia en los triodos "chicos", porque se los hace funcionar casi siempre sin que se la alcance. O, de otro modo, la corriente de placa máxima que se alcanza en funcionamiento, está limitada por otros factores que la capacidad de emisión del cátodo.

Para que usted pueda juzgar por sí mismo, damos en la Fig. 24 las características de placa de la 6C8. Para evitar confusiones conviene medir las distancias no en centímetros sino en volts o en amperes, según se la considere en sentido horizontal o vertical. Además, hay que tener cuidado de que los pares de curvas cuyas distancias se comparen correspondan a valores de tensión de reja separados del mismo intervalo, digamos 1 volt ó 10 volts o lo que sea. Lo más conveniente será,

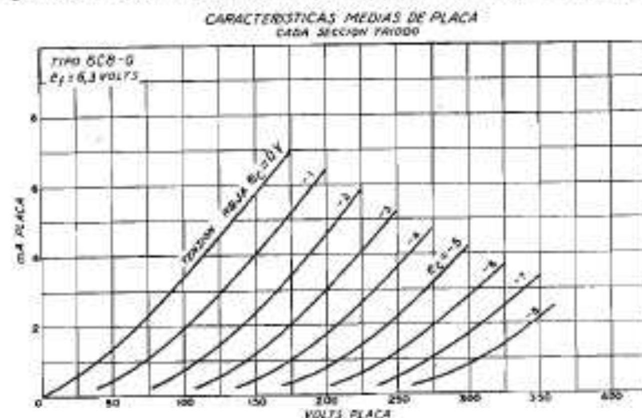


Fig. 24 — Características de placa del triodo 6C8.

sin duda, expresar la distancia entre curvas para las cuales dicha diferencia sea de 1 volt. Por ejemplo, en la 6C8, cuyas curvas se han trazado para valores de e_c variados de volt en volt, la distancia horizontal entre dos curvas sucesivas es de unos 35 volts. En el gráfico de la 6J5, las curvas corresponden a diferencias de 2 volts en reja. Se ve que la distancia horizontal, para 2 volts de diferencia en reja, es de 40 volts, y con un poco de imaginación se deduce que las curvas correspondientes a una *variación* de 1 volt en reja estarán separadas precisamente de 20 volts, es decir, la mitad.

Podríamos decir entonces que las curvas se desplazan unos 35 volts en la 6C8 y unos 20 volts en la 6J5, por cada volt de variación de la tensión de reja. Convengamos en decir, para ser más concisos, que el *factor de amplificación* de la 6C8 es de 35 y el de la 6J5, de 20. Después veremos el porqué del nombre. Por ahora tengamos presente que esa cifra no es más que una manera de expresar la distancia a que nos referimos.

La inclinación (o pendiente) de una recta se expresa en geometría por el ángulo que forma con la horizontal. Al hablar de la inclina-

ción de las características de una válvula nos encontramos con dos dificultades: primero, que las líneas son curvas y no rectas, y, por lo tanto, su inclinación es variable; segundo, que la inclinación *medida por el ángulo* lleva a terribles confusiones, ya que depende de la forma en que hemos marcado los valores de tensiones y de corrientes. El primer inconveniente se salva si (al menos por ahora) nos limitamos a considerar la parte más o menos recta de cada curva. El segundo, fijando la atención sobre dos puntos de la curva y expresando la relación que existe entre la distancia vertical y la distancia horizontal que median de un punto a otro. Por ejemplo, en la Fig. 23, elegimos los puntos de la curva $e_c = -2$, que corresponden, respectivamente, a ($e_b = 120$ V e $i_b \cong 8$ mA) y a ($e_b = 160$ V, $i_b \cong 13{,}5$ mA). La distancia vertical entre los dos puntos es de 13,5 mA — 8 mA = 5,5 mA, o sea 0,0055 ampere. La distancia horizontal, en cambio, es de 160 — — 120 = 40 volts.

Por lo tanto, la inclinación es 0,0055 amp. ÷ 40 volts = 0.00138 amper/volt. A esta inclinación se la llama *conductancia de placa*, que designaremos en adelante con el símbolo g_p. En la práctica se prefiere usar la recíproca de la inductancia de placa, 1 ÷ 0,000138 = 7200 volt/ampere ≅ 7200 ohms. Como volt dividido por ampere da ohm, este nuevo número es una resistencia. Es la *resistencia de placa* del triodo, la que designaremos con el símbolo r_p, y cuyo nombre justificaremos más adelante.

Conviene dejar registrada la observación que acabamos de hacer acerca de la relación recíproca que guardan g_p y r_p. Escribiremos, pues, la siguiente fórmula:

$$r_p = \frac{1}{g_p} \qquad (1)$$

o, lo que es equivalente

$$r_p \times g_p = 1 \qquad (2)$$

En lugar de describir el aspecto de la familia de curvas de placa por la distancia horizontal entre dos curvas, podemos hacerlo por la distancia vertical. Se observa aquí también que la distancia vertical depende de la región del gráfico en que se mida, a causa de la curvatura de las líneas. Como antes, salvamos el inconveniente refiriéndonos a la región recta de las curvas, donde dicha distancia es prácticamente la misma dondequiera que se la mida[1]. Por ejemplo, la distancia vertical entre las curvas correspondientes a $e_c = -4$ volts y $e_c = -2$ volts, medida según la vertical de $e_b = 160$ volts es de $13{,}5 - 8 = 5{,}5$ mA = = 0,055 ampere. Para una separación de 1 volt entre los valores de e_c de las curvas, la distancia será razonablemente la mitad de la anterior, es decir, 0,00275 ampere. Como esta distancia es la variación de corriente que corresponde a una variación de la tensión e_c de 1 volt podemos decir que la distancia entre las curvas de la familia de características de placa del triodo 6J5 es de 0,00275 *ampere por volt*. La palabra "por" no tiene aquí el significado de multiplicación sino precisamente lo contrario, es decir, el de división. En efecto, para obtener esta cifra hemos dividido 0,0055 ampere *por* 2 volts y el resultado es

[1] O, si se juzga conveniente, especificando el lugar donde se ha medido.

$$\frac{0{,}055 \text{ ampere}}{2 \text{ volts}} = 0{,}00275 \frac{\text{ampere}}{\text{volt}}$$

Cuando al aplicar a un resistor una tensión de 1 volt circula por él una corriente de 1 ampere, la ley de Ohm nos dice que

$$R = \frac{E}{I} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ ampere}} = 1 \frac{\text{volt}}{\text{ampere}} = 1 \text{ ohm}$$

Pero el mismo hecho se puede expresar escribiendo la ley de Ohm al revés, es decir en la forma $\frac{1}{R} = \frac{E}{I}$

En este caso

$$\frac{1}{R} = \frac{1 \text{ ampere}}{1 \text{ volt}} = \frac{1}{\text{ohm}}$$

Como es incómodo manipular un símbolo de la forma 1/R usaremos las letras *G* o *g* para designar a *1/R*, y aplicaremos a su valor el nombre de *conductancia*. La conductancia de un resistor es, pues, la recíproca de su resistencia. Del mismo modo ampere ÷ volt es la recíproca de volt ÷ ampere, es decir, del ohm. A la recíproca del ohm se le llama mho (la palabra ohm deletreada al revés). ¿Cuál es la conductancia de un resistor que tiene una resistencia de 50 ohms? Según lo dicho

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{50 \text{ ohms}} = 0{,}02 \frac{1}{\text{ohms}} = 0{,}02 \text{ mhos}$$

Concluímos, por lo tanto, que la distancia vertical que nos ocupa es de 0,00275 mhos. En la práctica resulta inconveniente manipular fracciones decimales, y en lugar de usar el mho expresaremos estas distancias en micromhos, del mismo modo que, tratándose de resistencias muy pequeñas, usamos el microhm en lugar del ohm. Como micro significa *millonésima parte de*, se tiene

$$1 \text{ micromho} = \frac{1 \text{ mho}}{1\,000\,000} = 10^{-6} \text{ mhos}$$

Por lo tanto

$$0{,}00275 \text{ mhos} = 0{,}00275 \times 1\,000\,000 \text{ microhmos} = 2750 \text{ micromhos}$$

Tal como la hemos definido y medida en mhos o en micromhos, como más le convenga, la distancia vertical por volt se llama *conductancia mutua* o mejor *transconductancia* del triodo. Se la designa con el símbolo g_m.

Uno de estos valores característicos, factor de amplificación (μ), resistencia de placa (r_p) y transconductancia (g_m) es superabundante. Esto es un modo de decir que sólo necesitamos dos de ellos para describir la forma general de las curvas características. En efecto, usted mismo puede comprobar que

$$\text{inclinación de las curvas} = \frac{\text{separación vertical en amperes por volt}}{\text{separación horizontal en volts por volt}}$$

y según hemos bautizado a estas cantidades

$$g_p = \frac{g_m}{\mu} \qquad (3)$$

y puesto que

$$g_p = 1 \div r_p$$

$$\frac{1}{r_p} = \frac{g_m}{\mu} \therefore g_m r_p = \mu \qquad (4)$$

En nuestro caso hemos obtenido para la 6J5, $\mu = 20$, $r_p = 7200$ ohms, $g_m = 0{,}00275$ mhos. Verificando la ecuación (4)

$$g_m r_p = 0{,}00275 \times 7200 = 19{,}8 \cong \mu$$

La pequeña discrepancia que resulta se debe simplemente a la imposibilidad de leer *exactamente* los valores gráficos.

Ejemplo. El factor de amplificación del triodo 6C5 es el de 20; su trasconductancia es de 2000 micromhos. ¿Cuál es su resistencia de placa?

Solución. Invirtiendo los términos de la ecuación (4) se tiene

$$r_p = \frac{\mu}{g_m}$$

Ahora bien, 2000 micromhos equivalen a 0,002 mho, es decir, 0,002 ampere ÷ volt. Luego

$$r_p = \frac{20}{0{,}002 \dfrac{\text{ampere}}{\text{volt}}} = 10.000 \frac{\text{volt}}{\text{ampere}} = 10.000 \text{ ohms}$$

Ejercicio. En el triodo 6SF5 se tiene, según el manual, $\mu = 100$; $g_m = 1500$ micromhos. ¿Cuál es su resistencia de placa? Respuesta: 66.000 ohms.

Ejercicio. La resistencia de placa de un triodo 2A3 es de 800 ohms y la trasconductancia de 5250 micromhos. ¿Cuál es el factor de amplificación? Respuesta: 4,2.

Los fabricantes europeos suelen dar la trasconductancia en ***miliamperes por volt***, es decir, miden la distancia vertical en miliamperes en lugar de amperes. Y dado que

$$1 \text{ ampere} = 1000 \text{ miliamperes}$$

$$1 \frac{\text{amper}}{\text{volt}} = 1 \text{ mho} = 1000 \frac{\text{miliamperes}}{\text{volt}} = 1000 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$1 \text{ mho} = 1\,000\,000 \text{ micromhos} \therefore 1 \text{ micromho} = \frac{1}{1000} \frac{\text{miliampere}}{\text{volt}}$$

y de aquí se deduce con un pequeño esfuerzo mental:

$$\text{trasconductancia en micromhos} = 1000 \times \text{trasconductancia en} \frac{\text{mA}}{\text{volt}}$$

$$\text{trasconductancia en mhos} = \frac{1}{1000} \times \text{trasconductancia en} \frac{\text{mA}}{\text{volt}}$$

Ejemplo. La trasconductancia de un triodo ECC40 es de 2,7 mA/V. ¿Cuál es su valor en mhos y cuál en micromhos?

Según lo anterior se tiene, evidentemente

$$g_m = 2{,}7 \frac{\text{mA}}{\text{V}} = 0{,}0027 \text{ mho} = 2700 \text{ micromhos}$$

Ejercicio. La sección triodo de la válvula de doble propósito ECF1 tiene una trasconductancia de 2,2 mA/V y una resistencia de placa de 9000 ohms. ¿Cuál es su factor de amplificación? Respuesta: 20.

6.4 — Otra interpretación de los factores del triodo. Los factores del triodo se pueden interpretar también en otra forma, que muchos prefieren a la anterior, aunque es menos objetiva. Volvamos a nuestra instalación de prueba de la Fig. 21, donde suponemos que experimentamos con un triodo 6J5. Hagamos $e_b = 120$ volts y $e_c = -2$ volts. La corriente de placa es (véase la Fig. 23) de 8 mA. *Variemos* la tensión de placa en *sentido positivo* llevándola a 160 volts, dejando e_c inalterada. La corriente varía, también en sentido positivo, pasando a 13,5 mA. ¿Cuánto hubiera variado la corriente de placa si la variación de la tensión de placa se hubiera limitado a 1 volt? Es fácil darse cuenta que, al menos aproximadamente,

$$\left.\begin{array}{l}\text{La variación de la corriente de}\\ \text{placa que corresponde a la va-}\\ \text{riación de 1 volt de la tensión}\\ \text{de placa, con } e_c = -2\end{array}\right\} = \frac{\begin{array}{l}\text{Variación de la corriente de pla-}\\ \text{ca en amperes para 40 volts de}\\ \text{variación de la tensión de}\\ \text{placa, con } e_c = -2\end{array}}{\begin{array}{l}\text{Variación de la tensión de pla-}\\ \text{ca } (= 40 \text{ volts})\end{array}}$$

$$= \frac{13{,}5 \text{ mA} - 8 \text{ mA}}{40 \text{ V}} = \frac{5{,}5 \text{ mA}}{40 \text{ V}} = \frac{0{,}0055 \text{ A}}{40 \text{ V}} = 0{,}0138 \text{ A/V}$$

Se observa que este resultado es el mismo que obtuvimos anteriormente al calcular la *conductancia de placa* del mismo triodo. Y es lógico que sea así, puesto que hemos realizado las mismas operaciones llamando con diferente nombre a los grandores que intervienen. Podemos decir, por lo tanto, que la *conductancia de placa del triodo es la variación de la corriente de placa por cada volt de variación de la tensión de placa, cuando la tensión de reja queda constante.* Para representar las variaciones, los matemáticos usan el símbolo Δ (*delta*) antepuesto a la cantidad que se supone variar. Δi_b significa, simplemente, "una variación de la cantidad i_b". Es una cómoda abreviatura, y la relación expresada más arriba se escribe entonces en forma mucho más breve.

$$g_p = \left[\frac{\Delta i_b}{\Delta e_b} \right] e_c = \text{const.} \qquad (5)$$

Las barras y la indicación $e_c = \text{const.}$ significa que para la determinación de g_p no debe variarse e_c. Si usted prefiere, puede indicar el valor de e_c con el cual se hace el cálculo; por ejemplo $e_c = -2$ V en nuestro caso.

Dado que la resistencia de placa es la recíproca de la conductancia, resulta entonces

$$r_p = \left[\frac{\Delta e_b}{\Delta i_b} \right] e_c = \text{const.} \tag{6}$$

Del mismo modo usted puede verificar que

$$\text{Trasconductancia} = \frac{\text{Variación de la corriente de placa que resulta de una variación de la tensión de reja, con } e_b = \text{const.}}{\text{Variación de la tensión de reja}}$$

o, en forma abreviada

$$g_m = \left[\frac{\Delta i_b}{\Delta e_c} \right] e_b = \text{const.} \tag{7}$$

Para interpretar el nuevo significado del factor de amplificación, partiendo del punto ya considerado ($e_b = 120$ volts, $e_c = -2$ volts e $i_b = 8$ mA) demos a e_c una variación positiva de 2 volts ($\Delta e_c = 2$ V) pasando así a $e_c = 0$ V. La corriente de placa aumenta así a 13,5 mA. Dejando e_c en 0 V, disminuyamos la tensión de placa a 80 volts, es decir, démosle una variación negativa de 40 volts ($\Delta e_b = -40$ V). Observemos ahora que la corriente de placa vuelve al valor primitivo de 8 mA. La variación de la corriente de placa producida por una variación positiva de la tensión de reja se ve compensada por una variación negativa, de grandor adecuado, de la tensión de placa. Hagamos la relación entre estas dos variaciones:

$$\left[\frac{\Delta e_b}{\Delta e_c} \right] \text{que dejan constante } i_b = \frac{-40 \text{ V}}{2 \text{ V}} = -20$$

Se observa que si no fuera por el signo negativo, esta cantidad sería precisamente el valor del factor de amplificación. Si cambiamos el signo del cociente de las variaciones, tenemos entonces

$$\mu = -\left[\frac{\Delta e_b}{\Delta e_c} \right] i_b = \text{const.} \tag{8}$$

Exprese usted mismo la definición de μ según la nueva interpretación. Es decir, *diga con palabras* lo que la ecuación (8) dice con símbolos.

El nombre de *factores variacionales* (o diferenciales) se justifica ahora cuando se lo aplica en forma genérica a μ, r_p y g_m: se los define, en efecto, como las relaciones que existen entre *variaciones* o *diferencias* de corrientes y tensiones.

EJERCICIOS. Calcule los factores variacionales de los triodos 6J5 y 6C8 partiendo de diferentes puntos iniciales en las Figs. 23 y 24.

PRÁCTICA. Si está en condiciones de montar una instalación como la de la Fig. 21, determine experimentalmente los factores variacionales y compare los resultados con los que obtuvo utilizando las Figs. 23 y 24.

OTRA. Trate de interpretar el significado de los factores variacionales sobre las características tensión de reja-corriente de placa que se dan en la Fig. 22 para el triodo 6J5, en términos de la inclinación y las distancias de y entre las curvas. Observe en particular el significado de g_m. Los europeos llaman *pendiente* (es decir, inclinación) a la transconductancia mutua. ¡Lo justifican así sus observaciones?

En el Apéndice, al final de este libro, continuamos tratando algo más sobre triodos, siguiendo la numeración correlativa de los párrafos. No lo incluimos aquí por no considerarlo de estudio indispensable y lo dejaremos para otra oportunidad.

7. TETRODOS Y PENTODOS

7.1 — La reja pantalla[1]. En el Apéndice se explica de qué manera la carga del circuito anódico de un triodo se *refleja* sobre el circuito de reja determinando dos efectos principales:

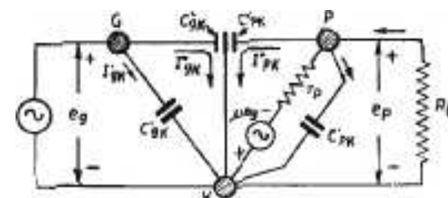
a) Aumento de la capacitancia aparente ofrecida al generador.

b) Transferencia de energía sea del circuito de reja al de placa (carga de placa capacitiva), sea del circuito de placa al de reja (carga de placa inductiva).

Ambos efectos constituyen serios inconvenientes para las aplicaciones más importantes del triodo. Podrá argüirse, sin embargo, que en ciertos casos esos efectos se aprovechan para lograr determinados fines (por ejemplo, en algunos tipos de *osciladores*), pero aun entonces es una desventaja el que ellos queden fuera del control del proyectista.

La causa de los mismos hay que buscarla en la presencia de la capacitancia interelectródica C_{gp}. La Fig. 55 muestra, en efecto, que tal capacitancia está vinculando entre sí los circuitos de reja y de placa y ofrece un camino por el cual es posible el intercambio de corrientes entre ambos circuitos. Después de todo, los dos efectos que enunciamos separa-

Fig. 25 — Procedimiento ideal para eliminar radicalmente C_{gp}. El capacitor C_{gp} de la Fig. 55 se parte en dos mediante la interposición de una tercera armadura unida directamente al cátodo.



damente tienen la misma raíz y radican en ese traspaso de corriente de un circuito a otro: Cuando la corriente es puramente del tipo capacitivo, es decir, cuando resulta adelantada en fase de 90° con respecto a e_p, el resultado es el aumento de la capacitancia de entrada aparente; cuando dicha corriente tiene una componente *en fase* con e_p, aparece una resistencia positiva entre reja y cátodo; cuando hay una componente en fase con e_p, entonces aparece finalmente una resistencia negativa.

La supresión radical de este inconveniente exige la eliminación de C_{gp}. ¿Cómo puede logrársela? La Fig. 25 muestra una modificación del circuito equivalente de la Fig. 55, donde el camino de las corrientes que nos ocupan ha sido desviado hacia el cátodo gracias al agregado de una tercera armadura en C_{gp} conectada al cátodo. El capacitor C_{gp} queda así descompuesto en dos capacitores, C''_{gk} y C''_{pk} tales que ambos tienen una armadura conectada al cátodo. De este modo, C''_{gk} queda en paralelo con C'_{gk} y forma una capacitancia total de reja a cátodo $C_{gk} = C'_{gk} + C''_{gk}$.

[1] Para entender los tres primeros párrafos de esta sección debe leerse el Apéndice. Es el único modo de comprender por qué nacieron el tetrodo y el pentodo.

Igualmente, C''_{gk} viene a quedar en paralelo con C'_{pk} para formar la capacitancia total de placa a cátodo $C_{pk} = C'_{gk} + C''_{gk}$. Mientras tanto, ninguna corriente puede existir ya entre los puntos G y P, puesto que las que podrían presentarse se ven *derivadas* hacia el cátodo por medio de una conexión directa.

El problema consiste ahora en realizar un tubo que satisfaga o al cual convenga el circuito equivalente de la Fig. 25. La solución la da el *tetrodo*.

Un tetrodo no es más que un tubo en el cual, a la estructura básica del triodo, cátodo, reja, ánodo, se le ha agregado una segunda reja, interpuesta entre la primera y la placa. La Fig 26 muestra los símbolos convencionales que se utilizan para la representación de los tetrodos en los circuitos de radio. La nueva reja se llama ***reja pantalla*** o ***reja Nº 2;*** la otra, para distinguirla de ésta se llamará en adelante ***reja de control*** o ***reja Nº 1.*** El nombre genérico de reja aplicado al nuevo electrodo se justifica porque su estructura es similar a la de la reja de control: un alambre arrollado en hélice cilíndrica. Tiene que usarse este estilo de construcción por fuerza, porque sigue siendo interés primordial que los electrones sean recogidos, como antes, por la placa. En el caso ideal, la pantalla no debiera recoger otra corriente que las i''_{gk} e i''_{gk} de la Fig. 25. Téngase presente que estas corrientes, lo mismo que i'_{gk} e i'_{gk} no tienen nada que ver con los electrones emitidos por el cátodo; ellas, en efecto, existen igualmente y son aproximadamente las mismas sea que el cátodo esté caliente, sea que esté frío. Los espacios abiertos de la pantalla deben permitir el paso de los electrones encaminados hacia la placa. La acción derivadora que supusimos en la Fig. 25 no es, a causa de la construcción abierta de la pantalla, perfecta; las rejas y la placa de un tetrodo forman un sistema de tres cuerpos y como en cualquier sistema de tres cuerpos hay capacitancia entre dos cualesquiera de ellos: por lo tanto, hay en el tetrodo una capacitancia C_{gp} residual, pero con una construcción adecuada se consigue que este residuo no exceda de la milésima parte del valor que tendría C_{gp} si se suprimiera la pantalla. En un tetrodo típico antiguo, el tipo 24—A, C_{gp} se reduce a sólo 0,007 $\mu\mu$ F. Tal "construcción adecuada" toma a menudo la forma que muestra la Fig. 27; en ella la acción "de pantalla" de la grilla Nº 2 se completa agregando un ***blindaje interior*** que rodea casi completamente a la placa.

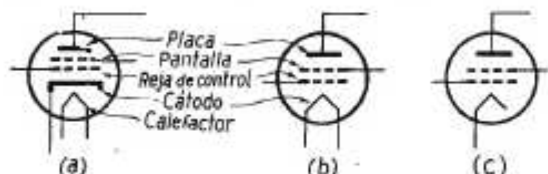


Fig. 26 — Representación convencional del tetrodo. La construcción se muestra en la Fig. 27.

En la práctica, para que el tetrodo funcione, no es posible unir la pantalla *metálicamente* (es decir, con un conductor metálico de resistencia casi nula) al cátodo. En efecto, si la pantalla se pusiera de este modo al mismo potencial que el cátodo, los electrones liberados por éste *serían frenados* por la pantalla y devueltos en su mayor parte a su fuente. La corriente de placa sería así prácticamente nula. Por eso es necesario aplicar un potencial positivo a la pantalla, tal como se

ve en el circuito típico de utilización que muestra la Fig. 28. **Es importante proveer para la polarización de pantalla una fuente de características adecuadas.** Para que la pantalla funcione como tal es necesario que permita el ***libre paso*** de las corrientes i''_{gk} e i''_{gk} hacia el cátodo. Estas corrientes sólo se presentan cuando hay aplicada una tensión alterna e_g a la reja de control, y son necesariamente alternadas. Por lo tanto, la fuente de tensión de pantalla debe ofrecer una impedancia *despreciable* a las corrientes alternas de la frecuencia aplicada a la reja de control. Esta cuestión es de *fundamental importancia,* pero muchas veces se la olvida. Para proveer ese camino de impedancia despreciable se acostumbra a conectar exteriormente un capacitor de bastante capacitancia entre la pantalla y el cátodo.

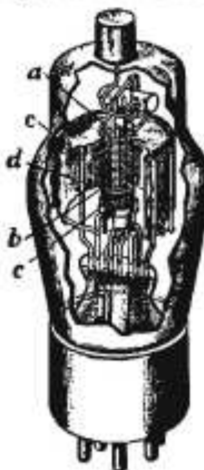


Fig. 27 — Construcción del tetrodo con pantalla y blindaje interno adicional. a) Cátodo; b) reja de control; c) reja pantalla y blindaje; d) placa.

Ahora bien, si el cátodo está rodeado por las dos rejas, una de las cuales es la pantalla (que se mantiene a un potencial constante), la acción de la placa sobre la región vecina al cátodo, allí donde son decisivas las fuerzas que obran sobre los electrones, sólo se manifiesta a través de la reja de control y de la pantalla. Si ésta estuviera constituída por un cilindro de paredes llenas, dicha acción sería nula; si a tal cilindro le practicamos algunos pequeños agujeros, la acción sería muy débil, fácil es comprenderlo. Si agrandamos los agujeros y aumentamos su número la acción es algo mayor, pero, en realidad, aun con la construcción práctica en hélice de la pantalla, de amplias aberturas, su presencia, a potencial constante, es suficiente para debilitar enormemente la acción de la placa. En consecuencia, la corriente total a través del tubo depende muy poco del potencial de la placa. Con la pantalla positiva, la corriente total abandonada por el cátodo se reparte entre la pantalla y la placa. Dada la construcción de la pantalla, los electrones acelerados la atraviesan en su mayor parte sin dificultad, colándose por los espacios vacíos, y llegan finalmente a la placa si ésta es también positiva. Sólo los electrones que siguen trayectorias que los llevan a chocar directamente con los alambres de la pantalla, o que pasan muy cerca de éstos, **son apresados por el nuevo electrodo y aparecen como corriente de pantalla. Aceptando que la mayor parte de la corriente emitida es corriente de placa,** se comprende que la ***corriente de placa resulta, en principio, muy poco sensible a las variaciones del potencial de placa.*** A valores de Δe_b **grandes,** corresponden valores Δi_b pequeños, y puesto que el cociente de **estas variaciones es la resistencia de placa,** resulta que la resistencia de **placa de los tetrodos es muy alta debido a la acción de la pantalla.**

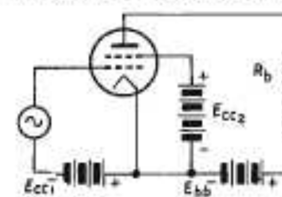


Fig. 28 — Circuito básico de utilización del tetrodo. Nótese que no hay "carga" en la pantalla.

Nuestro razonamiento sería perfecto si no adoleciera de un par de deficiencias. Hemos dejado de lado, en efecto, un par de fenómenos menores que echan por tierra todo nuestro raciocinio, por lo menos cuando el potencial de la placa es muy bajo. Vamos a explicarlos teniendo a la vista las curvas tensión de placa-corriente de placa del tetrodo 24—A, Fig. 29, obtenidas experimentalmente; puede emplearse, para su trazado, la instalación de la Fig. 21 agregando una fuente de polarización de pantalla (90 volts, en este caso). Se observa que la forma de las curvas que obedece a nuestras previsiones cuando la tensión de placa, e_b, es mayor que unos 100 volts, pero se aparta completamente de lo supuesto cuando e_b es menor que este valor crítico.

Comenzamos por notar que la corriente de placa es prácticamente cero cuando e_b es nula, mientras que la corriente de pantalla es considerable en tales circunstancias. (¡Nunca, por esta causa, hay que dejar conectada la tensión de pantalla en un tetrodo si falta la tensión de placa!) Este aspecto del fenómeno se explica muy fácilmente. Los electrones acelerados por la pantalla, son frenados una vez que la han pasado por la acción conjunta de pantalla y placa. Se *amontonan*, en consecuencia, en el espacio comprendido entre estos electrodos y forman una carga espacial parecida a la que se forma alrededor de la reja de control, la cual, por su carácter negativo, rechaza hacia la pantalla a las otras partículas que tratan de incorporárseles. Al dar potenciales positivos a la placa, este efecto va aminorándose: la corriente de placa comienza a aumentar y la de pantalla a disminuir. Bien pronto, sin embargo, el crecimiento de la corriente de placa se atenúa y en seguida la corriente de placa, al parecer caprichosamente, comienza a disminuir y la de pantalla a aumentar. ¿Qué está ocurriendo? Es la emisión secundaria la que está desempeñando aquí un papel decisivo. A medida que la placa va haciéndose positiva, los electrones la alcanzan con velocidad cada vez mayor. Llega el momento en que la velocidad es lo bastante grande como para que comience a producirse la emisión secundaria en la placa por las razones que hemos explicado en otra parte del texto. Si en una billonésima de segundo, por ejemplo, llega un millón de electrones a la placa, éstos liberan, digamos, 200.000 electrones secundarios. ¿Qué ocurre con ellos? Ello se encuentran en el espacio pantalla-placa, ávidos de asociarse con cargas positivas. Como la pantalla es más positiva que la placa, se encaminan hacia la primera. **Resultado**: la corriente de placa en lugar de ser la que corresponde a un millón de electrones por millonésima de segundo, es sólo la que corresponde a 800.000 electrones en el mismo tiempo. Las esperanzas que habíamos puesto en el aumento del potencial de placa se han visto frustradas por este fenó-

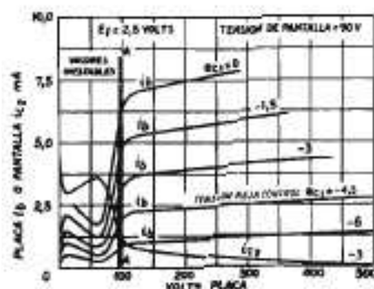


Fig. 29 — Características tensión de placa — corrientes de placa del tetrodo tipo 24-A. Han sido obtenidas manteniendo la pantalla a un potencial constante con respecto al cátodo de 90 V.

meno. (En el triodo también *hay* emisión secundaria, pero como en él la placa es el electrodo *más positivo*, los hijos pródigos no tardan en regresar a ella y... aquí nada pasó.) Un nuevo aumento de la tensión de placa significa más velocidad de los electrones primarios; mayor proporción de éstos son capaces de arrancar electrones secundarios; por ejemplo, cada 1.000.000 de primarios produce 400.000 secundarios; la corriente de placa disminuye si perdura la preferencia por la pantalla, es decir, si ésta sigue siendo más positiva que la placa.

Finalmente, mayores potenciales de placa terminan por darle un potencial del mismo orden y después mayor que el de pantalla. La emisión secundaria se activa, pero los electrones secundarios comienzan a retornar a la placa cada vez en mayor proporción y por fin en su totalidad. Tal cosa ocurre un poco a la derecha de la línea A—A en la Fig. 29. Con e_b mayor que 100 volts (en general, mayor que la tensión de pantalla), nuestras primeras previsiones comienzan a cumplirse satisfactoriamente.

Pero... aun hay un pero si queremos hilar fino. Observemos todavía que la corriente de placa crece con e_b, a la vez que la corriente de pantalla disminuye. Este efecto es mayor que el que podría esperarse y explicarse por la imperfecta acción de la pantalla. Y es que ahora los papeles se han invertido: también en la pantalla hay emisión secundaria, pero los electrones producidos van hacia el electrodo más positivo, en este caso la placa, y refuerzan el flujo de electrones primarios. Esta es la explicación de la mayor parte del crecimiento de la corriente de placa; el resto se debe a la acción residual del potencial de placa sobre la región vecina al cátodo.

7.2 — Pentodos. La región de las características tensión de placa-corriente de placa que está a la izquierda de la línea A—A de la Fig. 29, puede considerarse "tabú" en las aplicaciones más usuales del tubo electrónico. En ocasiones, sin embargo, se aprovecha con fines especiales la parte donde las curvas se inclinan hacia abajo. En efecto, aquí a un Δe_b positivo corresponde un Δi_b negativo; la resistencia variacional de placa es, por lo tanto, negativa y, además, dependiente de la polarización de la reja de control. Es, pues, el tetrodo un dispositivo capaz de proveer una resistencia variacional negativa, y cuando se lo aprovecha en este carácter se lo llama *dinatrón*. Las aplicaciones del dinatrón son escasas, sin embargo, y la conformación peculiar de las características en esa región se puede considerar como un lamentable defecto de esta clase de tubos.

¿Cómo salvar esta dificultad? Hay dos caminos: primero, eliminar la emisión secundaria; segundo, dejar la emisión secundaria en paz, pero *evitar sus efectos*. El primer camino es muy difícil de transitar; después de muchos esfuerzos en ese sentido, lo único que se consiguió fué disminuir la proporción de electrones secundarios estudiando las condiciones más convenientes de la superficie del material que forma la placa; en los más primitivos tetrodos existían circunstancias en que resultaban más electrones secundarios que primarios: la placa sufría un saldo negativo en su balance, y su corriente llegaba a *invertirse*. En

algún vetusto manual de válvulas encontrará el lector la confirmación de este hecho al consultar las características del tetrodo tipo 24, antecesor del tipo 24—A. El segundo camino ofrece un panorama más atractivo. Hay que obligar a los electrones secundarios a volver a la placa. ¿Cómo? Ya que estamos en tren de agregar rejas, agreguemos una más: la Nº 3 o *reja supresora*, Fig. 30 (a). La ubicaremos entre la pantalla y la placa y le adjudicaremos un potencial negativo con respecto a la placa, por ejemplo el mismo que el cátodo, Fig. 30 (b). Hagámosla de mallas muy abiertas para no estorbar la marcha de los electrones primarios. ¿Qué pasará con los electrones secundarios? Siguen produciéndose, pero al nacer, no más, se encuentran entre la reja supresora, que está al potencial del cátodo, y la placa, que, como mínimo, está al mismo potencial, pero en general a potencial positivo. Resultado: los electrones secundarios retornan a la placa y asunto acabado.

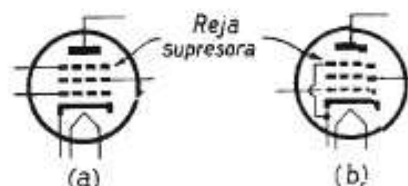


Fig. 30 — Representación convencional del pentodo en los circuitos. En algunos casos, la reja supresora va unida al cátodo en el interior de la ampolla. En otros, aparece conectada a una de las patitas de la base.

La Fig. 31 muestra las características tensión de placa-corriente de placa de un pentodo típico: el tipo 6SJ7. Después de un período de crecimiento, las curvas se aplanan y se transforman casi en rectas paralelas al eje de las tensiones de placa, sobre todo para polarizaciones bastante negativas de la reja de control. Este aplanamiento, mayor que el notado en las características del tetrodo, se debe a que la reja supresora no sólo impide la llegada de los electrones emitidos por la placa a la pantalla sino también la llegada a la placa de los emitidos por la pantalla. La capacitancia C_{gp} queda prácticamente la misma que en el tetrodo; la supresora, por sus mallas muy abiertas, no modifica la situación en este sentido sino en muy pequeña medida.

Si usted es un lector curioso se preguntará por qué la acción de la reja supresora es suficiente para impedir la vagancia de los electrones secundarios y no estorba, al menos al parecer, el paso de los primarios. La respuesta es sencilla: Los electrones primarios llegan a la supresora animados por la velocidad que les ha impreso la pantalla, y la reja supresora es impotente para detenerlos. En cambio, los electrones secundarios nacen en la placa con muy pequeña velocidad y basta muy poca fuerza para volverlos hacia atrás.

Y si usted es más curioso aún, se preguntará todavía por qué la corriente de placa es tan dependiente de la tensión de placa cuando ésta es menor que 50 volts. Sobre todo, la pregunta se justifica si se ha dado cuenta de que en el tetrodo 24-A el crecimiento de la corriente de placa es mucho más rápido (antes de empezar a hacer de las suyas la emisión secundaria) que en el pentodo 6SJ7. También tenemos una respuesta preparada: La acción de la carga espacial producida por el frenado de los electrones entre pantalla y placa se ve favorecida aquí por la presencia de la reja supresora a potencial de cátodo. Esa fea curvatura de la parte inicial de las características llena la región "tabú" de los pentodos. Es tan importante, que los investigadores han consumido mucho fósforo tratando de reducirla: el resultado es un nuevo tipo de válvula, el *tetrodo de haces electrónicos*, al que le dedicamos un párrafo más adelante.

7.3 — Factores variacionales del pentodo. Al observar las características de placa de la 6SJ7 lo primero que llama la atención es la casi nula inclinación de la parte recta de las curvas: la resistencia de placa del pentodo es elevadísima, tal vez un megohm o más.

Nos encontramos, por otra parte, con que la distancia horizontal entre las curvas es también descomunal: el factor de amplificación es, en consecuencia, altísimo; es muy difícil asignarle un número.

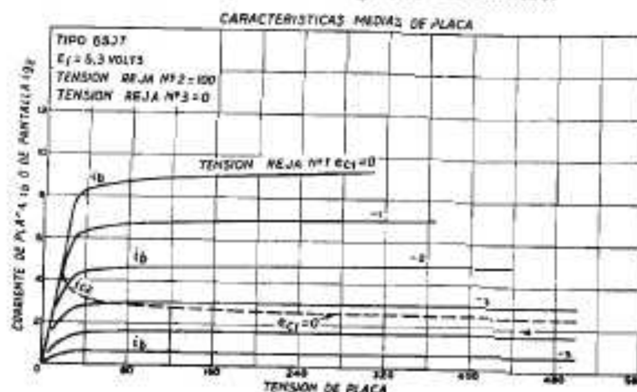


Fig. 31 — Características tensión de placa — corriente de placa del pentodo 6SJ7. Nótese el resultado de la eliminación de los efectos de la emisión secundaria comparando con la Fig. 29. Obsérvese también que la corriente de placa crece "lentamente" al principio, a causa del efecto frenante de la reja supresora.

¿Y la transconductancia? Midamos la distancia vertical (en la parte recta) entre las curvas $e_c = -2$ y $e_c = -4$. Es de 3,3 mA aproximadamente, es decir, del *mismo orden* que la que hay entre las curvas de igual designación de la *6J5*, medida sobre la vertical correspondiente a $e_b = 100$ volts. Curioso. Pero si usted tiene en su armario cadáveres de 6J5 y de 6SJ7 practíqueles la autopsia. Encontrará que ambas válvulas tienen el mismo cátodo y la misma reja de control, y que la pantalla de la 6SJ7 tiene el mismo diámetro que la placa 6J5. Como lo que pasa en el espacio cátodo-pantalla del pentodo no tiene nada que ver con la placa ni con la supresora, la acción de la reja de control es exactamente la misma (en principio) en los dos tipos de válvula. En consecuencia, el valor de la conductancia mutua de los pentodos tiene que ser semejante al de los triodos que tienen igual cátodo e igual reja de control, si además la placa es de igual diámetro que la pantalla y se trabajan al mismo potencial uno y otro electrodo. Si la 6SJ7 se usa como triodo, para lo cual basta con unir las rejas Nos. 2 y 3 exteriormente con la placa, sus características resultan, en efecto, casi idénticas a las de la 6J5. Véase la tabla siguiente.

Factores comparativos del triodo 6J5 y el pentodo 6SJ7

	6J5	6SJ7	6SJ7 (como triodo)
g_m	2600	1650	2500 μmhos
r_p	7700	10^6 (aprox.)	7600 ohms
μ	20	1650 (aprox.)	19
Corriente de placa:	9	3	9,2 mA
Condiciones de medición:			
e_{c1}	—8	—3	—8,5 volts
e_b	250	250	250 volts
e_{c2}	—	100	— volts

Los factores del pentodo se pueden definir también por las relaciones entre las variaciones Δe_b, Δi_b y Δe_c, exactamente como en el caso del triodo. Deberá tenerse en cuenta, sin embargo, que la tensión de pantalla se supone constante. A las fórmulas de las págs. 35 y 36 deberá agregarse, entonces, e_{c2} = *constante*.

Para ciertos cálculos conviene definir otro juego de tres factores, que expresan las relaciones entre las variaciones de la tensión de pantalla, la corriente del mismo electrodo y la tensión de reja. Los más importantes son:

Resistencia variacional de pantalla:

$$r_{g2} = \left[\frac{\Delta e_{c2}}{\Delta i_{c2}} \right] \begin{matrix} e_{c1} = \text{const.} \\ e_b = \text{const.} \end{matrix}$$

y el factor de amplificación reja de control-reja de pantalla:

$$\mu_{g1g2} = \left[\frac{\Delta e_{c2}}{\Delta e_{c1}} \right] i_b = \text{const.}$$

Los pentodos ofrecen, en general, importantes ventajas sobre los triodos, las cuales, generalmente, son consecuencia de la reducción a términos muy bajos de la capacitancia C_{gp}. Es muy importante observar que efectos similares a los que esta capacitancia produce pueden originarse por causa de cualquier otra capacitancia exterior que, en el montaje práctico del tubo, venga a quedar conectada entre la placa y la reja de control en forma más o menos directa. Por eso, cuando quieren aprovecharse al máximo las cualidades de este género de tubos, dichas capacitancias deben evitarse a toda costa, recurriendo a la adecuada disposición de los elementos que forman los circuitos de placa y de reja y de sus conexiones y, sobre todo cuando se trabaja en alta frecuencia, al blindaje de las conexiones, las partes del circuito e incluso el de la válvula.

7.6 — Tetrodos de haces electrónicos. Un tubo de haces electrónicos es un tetrodo en el que la acción de la reja supresora se consigue obligando a los electrones primarios a marchar hacia la placa a modo de haces. Con una construcción especial se logra que esos haces se estrechen en la región comprendida entre la pantalla y la placa, a fin de determinar así una carga espacial suficientemente densa como para devolver los electrones secundarios a la placa.

La construcción aludida se muestra en la Fig. 32. Su detalle más importante consiste en que la reja de control y la de la pantalla tienen igual número de espiras, igualmente espaciadas, y alineadas de modo que los alambres de la pantalla quedan a la "sombra", electrónicamente hablando, de los de la reja. La acción perturbadora de los soportes de las rejas se elimina evitando que los electrones que pasan por su proximidad lleguen a la placa por medio de las dos *pantallas deflectoras* que se ven en la figura, las cuales están unidas al cátodo. Estas placas contribuyen así a dar a los haces la sección rectangular que se aprecia en la figura.

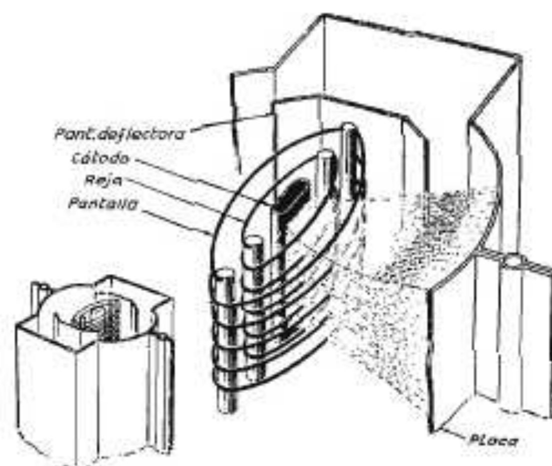


Fig. 32 – Construcción del tetrodo de haces electrónicos 6L6.

La Fig. 33 muestra las características de placa del tetrodo 6L6. Se observa que el crecimiento inicial de la corriente es muy rápido y que las curvas se aplanan en seguida. También se nota que al principio de las curvas e_c = — 20, e_c = — 25, etc., hay un ligero efecto de emisión secundaria. Ambos efectos se explican porque la acción supresora de los haces se regula, en cierto modo, automáticamente. Tensiones de placa bajas hacen menos concentrados los haces, disminuyendo su fuerza repulsiva; la corriente puede crecer entonces sin el obstáculo que representaba la reja supresora en el pentodo. A su vez, cuando la corriente está limitada por la reja de control a un valor muy bajo, el número de electrones en los haces es insuficiente para que la acción repulsiva sea eficaz; por eso perduran los efectos de la emisión secundaria en las condiciones anotadas más arriba.

La formación de los haces reporta una ventaja adicional. Hallándose la pantalla en la sombra de la reja de control, pocos son los electrones interceptados por aquélla. La corriente de pantalla es por eso mucho menor que en los pentodos comunes de tamaño similar.

7.7 — Válvulas de "supercontrol". Se ve en el Apéndice que la ganancia de un pentodo puede considerarse como directamente proporcional a su transconductancia en la mayoría de los casos. Observando las características de placa de la 6SJ7 se nota que la transconductancia depende de la tensión de reja de control y disminuye rápidamente al aumentar el valor negativo de ésta. Por consiguiente, podría pensarse en variar la tensión negativa de la reja de control para *modificar* la ganancia de un tubo amplificador. La necesidad de controlar la ganancia se presenta, por ejemplo, en los receptores, los cuales se sintonizan indiferentemente sobre radiodifusoras de muy diferentes potencias y que se hallan a distancias cualesquiera de nuestras antenas. El control de la ganancia por medio de la tensión de reja ofrece la ventaja de que puede hacerse en forma automática gracias al dispositivo llamado de *control automático de volumen o de sensibilidad.* Este método de control aplicado a la 6SJ7 conduce, sin embargo, a resultados desastrosos. La razón está en que cuando en esta válvula la tensión negativa de reja excede los 6 volts, la corriente de placa se acorta de un modo casi rotundo. Así, si con —5 volts en reja se pretendiera manejar tensiones e_g de 2 volts de amplitud, la corriente de placa se anularía para los valores instantáneos de e_g comprendidos entre —1 volt y —2 volts. Si e_g es senoidal i_p distaría mucho de serlo a causa de este corte; lo mismo pasaría con e_p, puesto que siendo $e_g = - i_p R_b$, tiene la misma forma de onda que i_p. Trastornos mucho más importantes ocurren en la realidad cuando las tensiones que se amplifican tienen una forma más complicada que la senoidal, pero no podemos estudiarlas aquí.

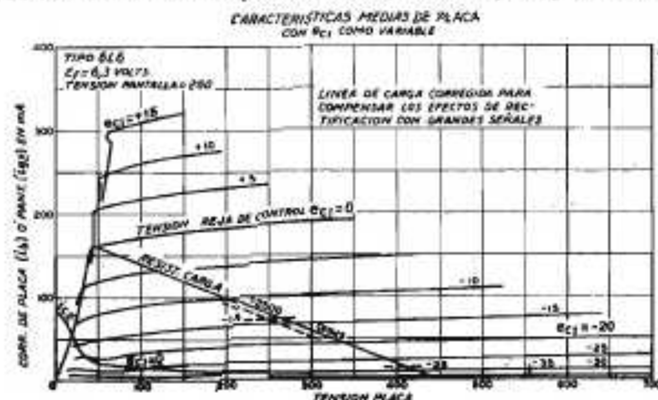


Fig. 33 – Características tensión de placa – corriente de placa del tetrodo tipo 6L6.

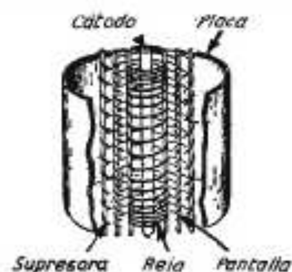


Fig. 34 – Construcción de un pentodo de "supercontrol" o corte remoto.

Por lo tanto, para disponer de un control de esta clase deben buscarse válvulas en las cuales la transconductancia disminuya paulatinamente al aumentar la tensión negativa de reja, sin que se produzca un corte repentino de la corriente de placa. Para resolver este problema basta con observar que la transconductancia de un tubo depende estructuralmente de la superficie activa del cátodo, de la distancia entre el cátodo y la reja de control y del espaciado de los alambres de ésta. Aumenta al disminuir el radio de la reja o el espaciado de los alambres. De los dos últimos factores depende también la tensión de corte de la válvula, es decir, la tensión negativa de reja para la cual se interrumpe la corriente de placa, pues la dependencia es directa: a menor radio y menor espaciado, menor tensión de corte.

Construyamos ahora una reja especial. Hagamos que el espaciado sea menor en los extremos de la hélice que en el centro, tal como se ve en la Fig. 34. Con una tensión negativa baja, la corriente fluye a través de todas las secciones de la reja, y la transconductancia será la que corresponde a un espaciado promedio entre el menor y el mayor de nuestra particular construcción. No es difícil comprender lo que pasa al aumentar ahora el valor negativo de la tensión de reja de control: llega un momento que la región de espiras más juntas tienen un potencial negativo bastante como para cortar la corriente de la parte del cátodo que enfrenta a aquélla; la superficie útil del cátodo se reduce y lo que queda trabaja con la zona de la reja de mayor espaciado: la transconductancia disminuye y la corriente de placa también. Cuanto más se aumenta la tensión negativa, más se reduce la superficie útil del cátodo y más se reduce también la transconductancia y la corriente. Pero para cortar completamente la corriente es necesario que la tensión negativa alcance el valor de corte que corresponde a la parte más espaciada de la reja. Mientras tanto, la transconductancia ha venido reduciéndose poco a poco. En el pentodo 6SK7, por ejemplo, la transconductancia es de 2000 μmhos para $e_{c1} = -3$ volts y se reduce a 10 μmhos cuando $e_{c1} = -35$ volts, valor para el cual recién se anula la corriente de placa. Con $e_{c1} = -30$ volts, se podrían, pues, manejar tensiones alternadas de reja de 5 volts de amplitud sin distorsión excesiva, pero con esa tensión fija de —30 volts la transconductancia es de sólo unos 25 μmhos. Es posible, pues, reducir la ganancia en la relación 2000 ÷ 25 = 80 por el método de la variación del potencial negativo de la reja de con-

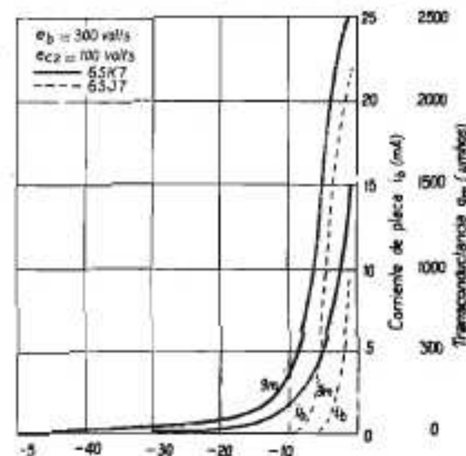


Fig. 35 – Estas curvas muestran cómo varían la transconductancia y la corriente de placa del pentodo de supercontrol 6SK7, y cómo las del pentodo 6SJ7.

trol. Con propósitos comparativos, la Fig. 35 muestra cómo varían la transconductancia y la corriente de placa de los tubos 6SJ7 y 6SK7 al variar la tensión negativa de la reja de control.

Las válvulas que emplean este tipo de reja se llaman de *supercontrol*, de *corte remoto* y, bastante impropiamente, válvulas de *μ variable*.

8. OTROS TIPOS DE TUBOS ELECTRÓNICOS

En los capítulos anteriores hemos examinado los principios generales que animan el funcionamiento de los tipos básicos de tubos electrónicos con cátodo térmico. Aparte de éstos, se utilizan en la técnica diversidad de tubos de otras clases, destinados a aplicaciones especiales. Nos proponemos pasar, en el presente capítulo, rápida revista a los más importantes.

8.1 — Válvulas combinadas o múltiples. Llamaremos así y también de doble o triple propósito al agrupamiento de dos o más válvulas simples, sean diodos, triodos, tetrodos o pentodos, en una misma ampolla. Muchas veces la corriente de emisión proviene de un único cátodo, pero es recogida por diferentes placas y controladas, si es el caso, por rejas independientes. En otras ocasiones hay un cátodo independiente para cada una de las unidades que forman el conjunto. Estas válvulas reciben nombres especiales según sea su composición. Tenemos así *doble-diodos* (dos diodos con cátodo común o no), doble-triodos (dos triodos), doble-diodo-triodo, triodo-pentodo, etc. La mayoría de las veces, el único objeto que se persigue con estas disposiciones es la economía de costo y de espacio; hay casos, sin embargo, en que las unidades del conjunto están interacopladas con vista a finalidades especiales.

8.2 — Válvulas con más de tres rejas. Para funciones especiales se encuentran válvulas que poseen 4, 5 y hasta 6 rejas, capaces de funcionar como rejas de control, de pantalla, supresora y aun como placas. Se llaman, según el número total de electrodos, hexodos, heptodos y octodos, respectivamente, aunque algunos tipos con 5 rejas se llaman también "pentagrillas".

En general estas válvulas tienen por objeto obtener resultados especiales por medio del control del flujo electrónico con dos tensiones independientes, aplicadas a otras tantas rejas. Se las halla como "conversoras" o "mezcladoras" en los receptores y en otros aparatos.

8.3 — Válvulas de cátodo térmico con gases. La presencia de gases o de vapores en la ampolla de una válvula de cátodo térmico tiene como acción principal la reducción de los efectos propios de la carga espacial, como consecuencia de la neutralización de ésta producida por los iones positivos del gas o del vapor. Estos iones positivos, que, como se ha dicho en otra parte, no son sino moléculas o átomos que han perdido uno o más electrones, son el resultado del proceso de "ionización por choque" a que nos hemos referido en el mismo lugar.

Dado que la carga espacial es el factor limitativo de la corriente, su desaparición se traduce en una corriente anódica que no está limitada sino por la capacidad del cátodo para emitir electrones o por la carga con que se utiliza el tubo.

Son particularmente importantes en el grupo *los diodos o rectificadores de mercurio*. Se trata de diodos de construcción más o menos convencional, en cuyos bulbos, una vez extraído el aire, se introducen algunas gotas de mercurio. Los vapores que se desprenden del líquido forman una atmósfera fácilmente ionizable.

La característica tensión de placa-corriente de placa de un diodo de esta clase, tiene, en términos generales y sin entrar a discutir el detalle, la forma genérica que muestra la Fig. 36, curva *a b c*. Cuando la tensión de placa es muy pequeña, la corriente varía como en un diodo de alto vacío común, porque el vapor no alcanza a ionizarse y la corriente está limitada por la carga espacial. Al alcanzar e_b unos 15 volts, los electrones se aceleran lo suficiente como para comenzar a producir la ionización, la carga espacial desaparece neutralizada por los iones positivos y la corriente aumenta entonces enormemente (zona *a b* de la curva) hasta alcanzar la zona *c* (si no hay nada que la limite antes), donde comienzan a notarse los efectos de la limitación de los electrones emitidos por el cátodo. En rigor, una vez iniciada la ionización, la tensión aplicada puede reducirse algo sin que ello impida el súbito crecimiento de la corriente. Por eso, la forma peculiar de la curva. En la práctica, un tubo de esta clase debe usarse *siempre* con cierta impedancia en serie para mantener la corriente dentro de los límites máximos permitidos por la capacidad del cátodo. En la figura se ilustra el caso en que la carga está constituída por un resistor de resistencia R_b. La corriente se calcula en la forma habitual, por el trazado de la línea de carga. Se tiene así I_{bo} como valor de la corriente y E_{bo} como valor de la tensión entre placa y cátodo o *caída de tensión* en el tubo. En condiciones normales de funcionamiento, esta tensión es casi constante (independiente de la corriente) y se encuentra entre unos 7 y unos 15 volts en los rectificadores de vapor de mercurio.

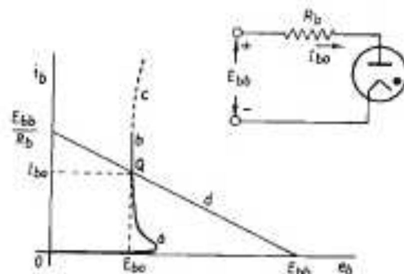


Fig. 36 — Circuito básico de utilización y característica volt-ampere de un rectificador de vapor de mercurio. La recta *d* es la línea de carga correspondiente al circuito ilustrado.

Si se reduce la resistencia R_b, el extremo izquierdo de la línea de carga se levanta, de modo que el punto *Q* pasa a la región *c* de la curva. Entonces, la caída de tensión del rectificador comienza a aumentar por insuficiencia de la emisión, pero los iones, cargados positivamente, son atraídos por el cátodo con fuerza creciente. El impacto de los iones sobre el cátodo destruye a éste en poco tiempo si la caída de tensión llega a ser de más de unos 22 volts. Antes de que el cátodo se destruya, la corriente sigue aumentando porque el choque de los iones con el cátodo aumenta su temperatura o le arranca electrones secundarios.

En estos tubos es algo crítica la temperatura del mercurio, que es la misma que la del bulbo. Cuando esta temperatura es baja, la evaporación del mercurio es poco activa, la densidad de la atmósfera es escasa y la probabilidad de los choques ionizantes, reducida. Resulta en-

tonces que la cantidad de iones producidos es insuficiente para neutralizar completamente la carga espacial; el efecto limitador de ésta se siente y la característica se inclina hacia la derecha, con lo que aumenta E_{bo}. Si E_{bo} llega a ser mayor que 22 volts, el cátodo sufre el devastador bombardeo de los iones positivos y se destruye total o parcialmente. Por esta razón el cátodo de estas válvulas debe encenderse tiempo antes de aplicar la tensión anódica; se da oportunidad así para que el bulbo y el mercurio se calienten. Este tiempo de calentamiento previo necesario va desde unos 30 segundos en los tubos chicos (por ejemplo el tipo 83), hasta algunos minutos en los grandes tubos rectificadores usados en los transmisores de gran potencia.

Cuando la temperatura del bulbo es excesiva, la ionización se ve facilitada hasta tal punto que puede llegar a producirse con el cátodo positivo si entonces su potencial con respecto al ánodo es muy alto. La válvula conduce entonces "al revés", dejando de ser un rectificador. Por lo común los límites de temperatura tolerados son 25°C y 60°C, con variaciones según el tipo, y sobre todo, según la capacidad deseada para resistir la conducción inversa.

La ionización del vapor de mercurio va acompañada de una luminiscencia color azul verdosa. Las válvulas tienen cátodos de óxidos y placas de construcción especial a fin de evitar la pérdida de calor por radiación.

Otros tipos de diodos rectificadores con gases son los que se usan en los cargadores de batería de pequeña capacidad, conocidos con los nombres comerciales de Tungar y Rectigon. Estos tienen un cátodo de tungsteno toriado y sus bulbos están llenos de gas *argón* a bastante alta presión, comparativamente hablando (equivalente a unos 5 cm de columna de mercurio). A causa de la presencia de esta atmósfera de gas, la velocidad de evaporación del torio se reduce mucho, la temperatura del cátodo puede entonces elevarse a valores mayores que los que serían aceptables en el vacío, y la emisión resulta, en consecuencia, muchísimo mayor (ver la Fig. 3).

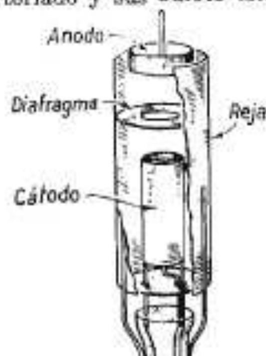


Fig. 37 – Construcción de un triodo "tiratrón" de control negativo (FG-27).

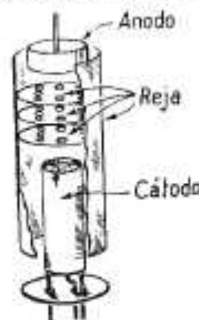


Fig. 38 – Construcción de un triodo tiratrón de control positivo (FG-33).

8.4 — Tiratrones. Los tiratrones pueden considerarse como triodos con vapor de mercurio. Sin embargo, el aspecto es bastante diferente

porque la "reja" está generalmente formada por un tubo cilíndrico que abraza al ánodo y al cátodo, el cual lleva, de modo que queden interpuestos entre ambos electrodos, una o más pantallas con agujeros, tal como se muestra en las Figs. 37 y 38 para casos típicos.

El funcionamiento de estos tubos se comprende sin dificultad. A causa de la acción de blindaje de la reja, el campo cerca del cátodo se debe casi totalmente al potencial de la reja. Por lo tanto, si desde un principio se aplica a la reja un potencial reducido con respecto al cátodo (negativo en algunos casos y aun también positivo en otros) la conducción es nula aunque el potencial positivo de placa sea muy alto.

Si aumentamos ahora en sentido positivo el potencial de reja, los electrones emitidos por el cátodo y acelerados por la reja, alcanzan energía suficiente como para iniciar la ionización. Comienza entonces la conducción o descarga como en el diodo de vapor de mercurio, siempre que la placa sea positiva.

La reja se encuentra ahora en una situación incómoda: la descarga, iniciada por su generosa contribución, no quiere saber nada con ella. La reja pierde toda capacidad de control en cuanto se inicia la conducción. ¿Por qué? Fácil es comprenderlo: así como los iones positivos neutralizan a la carga espacial, también se atreven con la reja. Si se hace negativo este electrodo con esperanzas de cortar el arco, una nube de iones lo rodea y lo inhiben de modo absoluto al neutralizar su carga. Más tensión negativa, significa solamente mayor densidad de la nube positiva. El arco se mantiene mientras la placa sea lo suficientemente positiva como para que la ionización no se interrumpa.

Pero si el ánodo se hace negativo o se pone a potencial nulo, la reja recupera sus fueros. Si el potencial de la reja es inferior al que se necesita para mantener la ionización, en el momento en que el potencial de la placa es nulo o negativo, la descarga se interrumpe y la reja vuelve a regir la situación.

La función principal de la reja consiste entonces en controlar la iniciación de la descarga. Para cada potencial de placa, hay un potencial de reja justamente suficiente para iniciar la descarga. Los manuales de válvulas dan curvas que representan la relación que existe entre cada potencial de placa y el potencial de la reja necesario, correspondientemente, para iniciar la conducción. Estas curvas se llaman *características de arranque* o *características críticas de reja*. Se observará que dependen de la temperatura del mercurio, porque de ésta depende, en parte, la posibilidad de la ionización. Hay válvulas en que la conducción sólo puede comenzar con potenciales positivos de reja: se las llama *válvulas de control positivo*. En otras, la conducción se inicia con potenciales negativos de la reja: son las *tiratrones de control negativo*. La Fig. 38 corresponde al primer tipo, y la Fig. 37 al segundo tipo. La diferencia está en que en el primer caso la acción de blindaje de la reja es mucho más completa que en el segundo. La Fig. 39 representa las características de arranque de los dos tipos ilustrados.

8.5 — Válvulas de descarga de cátodo frío. Hay otro tipo de conducción a través de los gases y vapores que difiere en algunos aspectos del anterior y que es importante por sus aplicaciones. Nos re-

ferimos a la *descarga luminiscente* entre electrodos fríos. Lo esencial del fenómeno es que si entre dos electrodos fríos encerrados en un bulbo donde se ha dejado una escasa cantidad de gases se aplica una diferencia de potencial creciente, se nota al principio una corriente muy escasa, que casi no puede medirse con aparatos comunes; pero cuando la di-

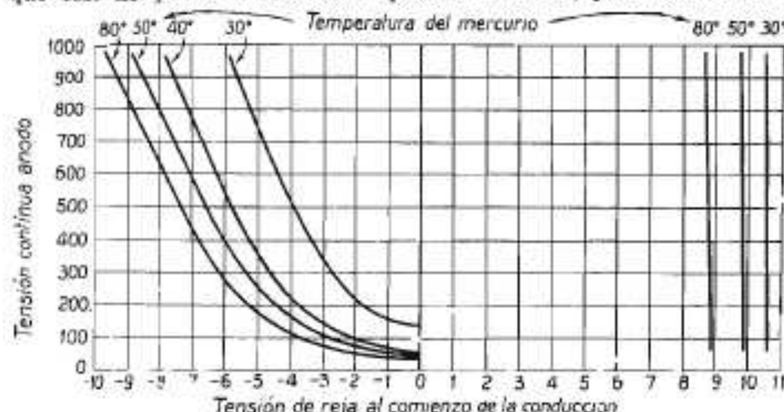


Fig. 39 — Características de arranque de los tiratrones tipo FG-27 (control negativo), a la izquierda, y tipo FG-33 (control positivo), a la derecha. Nótese la influencia de la temperatura del mercurio.

ferencia de potencial excede de cierto valor crítico, esa corriente sube bruscamente a valores del orden de las unidades o decenas de miliamperes. Al mismo tiempo aparece una luminiscencia de color característico, y la caída de potencial en el tubo se vuelve casi independiente de la corriente, siempre que ésta se mantenga dentro de ciertos límites. El valor de esta caída depende de la clase de gas y del material de los electrodos. Por lo común el gas es neón, argón o helio, y los electrodos son de hierro o de níquel o aleaciones especiales.

Algunas de estas válvulas se conocen comercialmente como "reguladores de voltaje", esto es, con la denominación de su principal aplicación. El circuito típico para esta aplicación es el que se muestra en la Fig. 40, que no requiere mayores explicaciones. El resistor en serie es necesario para limitar la corriente a través del tubo por debajo

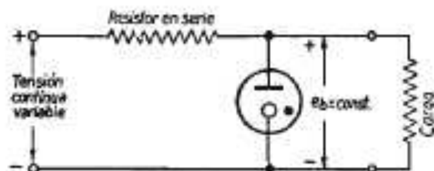


Fig. 40 — Circuito básico de un regulador de tensión.

del valor máximo tolerable. Mientras, sea por las variaciones de la tensión aplicada, sea por las variaciones de la resistencia de la carga, la corriente a través del tubo se mantenga dentro de los valores aconsejados por el fabricante, la tensión e_b se mantiene casi constante, dentro de 1 ó 2 por ciento de variación.

Tipos comunes son el OA3/VR75, en la cual la tensión e_b es de **75 volts**, OC3/VR105, de 105 volts, y OD3/VR150, de 150 volts. En **los tres** tipos los límites de corriente son de 5 y de 40 mA para el mínimo y el máximo respectivamente.

Hay también válvulas de esta clase que tienen un tercer electrodo, llamado *electrodo o ánodo de arranque*, dispuesto de tal modo que inicia la descarga cuando se le aplica un potencial menor que el que se necesitaría aplicar a la placa para obtener el mismo efecto.

Debe notarse que en los diodos de este tipo, el potencial necesario para iniciar la descarga es siempre mayor que la caída de potencial que después se establece. En la OA3, por ejemplo, se necesita aplicar 100 volts entre los electrodos para ello.

Por último, aunque la generalidad de estas válvulas conducen en ambas direcciones, se ha logrado construirlas también de conducción unidireccional, es decir, aptas para trabajar como rectificadoras. Un ejemplo es el tipo de Raytheon CK103. Los rectificadores de cátodo frío son interesantes porque no requieren energía de calefacción; resultan útiles, por lo tanto, para aparatos portátiles alimentados con acumulador o baterías, donde se requiere rectificar tensiones altas con baja corriente.

8.6 — Tanques rectificadores. Ignitrones. Nos limitamos a mencionar aquí la existencia de estos rectificadores industriales, caracterizados por emplear como cátodo un depósito de mercurio. Los tanques rectificadores se utilizan para obtener grandes corrientes a tensiones moderadas, por ejemplo, las que requieren las redes tranviarias, trenes u ómnibus eléctricos. Los ignitrones son rectificadores controlables, como el tiratrón, pero de mucho mayor capacidad. Se los utiliza en el control de soldaduras eléctricas y otras aplicaciones de tipo industrial.

8.7 — Tubos de rayos catódicos. Los tubos de rayos catódicos son tubos de cátodo caliente, en los que un chorro o pincel de electrones causa, por incidencia, la fluorescencia de una pantalla preparada al efecto. Utilizados primeramente en el laboratorio y otras aplicaciones especiales, el desarrollo de la televisión moderna los ha popularizado enormemente, ya que son parte indispensable de todo receptor.

Las partes esenciales del tubo de rayos catódicos son:

a) El *cañón electrónico*, que contiene el cátodo emisor y los electrones que permiten formar y controlar el haz o pincel. La Fig. 41 muestra con bastante detalle la constitución de esta pieza: El cátodo es del tipo de calentamiento indirecto; está formado por un cilindro de níquel recubierto por la substancia activa y lleva un calefactor de tungsteno. Aunque no se muestra en la figura, el cátodo va por lo común rodeado de otro cilindro de níquel sin fondos, de diámetro apenas superior que el primero y que se proyecta algo más allá del extremo derecho del cátodo. Este tubo está al mismo potencial que el cátodo y su misión es la de dar a los electrones una primera orientación. Sigue después la reja o electrodo de control, también de forma cilíndrica, cerrado en el extremo derecho por un diafragma que lleva en el centro un pequeño agujero por donde pasan los electrones. Este electrodo desempeña las mismas funciones que la reja de un triodo común, es decir,

controla la cantidad de electrones que abandonan el espacio cátodo-reja. Se lo usa con un potencial negativo o ligeramente positivo según los diferentes tipos de cañón.

Sigue después el *electrodo acelerador* o *primer ánodo*. También cilíndrico, tiene un diafragma con abertura en el extremo que enfrenta el electrodo de control, y uno o dos diafragmas similares en otras partes del cuerpo. Estos diafragmas tienen por objeto eliminar aquellos electrones que divergen fuertemente y que no podrían después enfocarse en la forma debida.

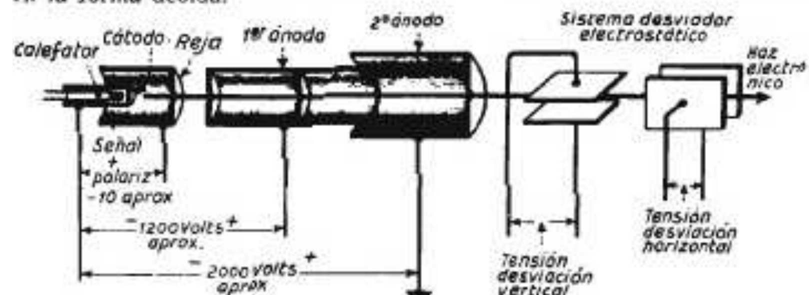


Fig. 41 – Disposición del cañón electrónico y del sistema deflector de un tubo de rayos catódicos.

El *enfoque* del haz en forma de pincel que presenta su menor sección en el punto de incidencia con la pantalla, está principalmente a cargo de un *segundo ánodo*, cilíndrico como los otros, y con o sin diafragmas. Se lo llama también *electrodo de enfoque*. El enfoque exacto se ajusta variando el potencial de este electrodo con respecto al del primer ánodo, que es fijo.

El cañón electrónico permite, pues, variar tanto la intensidad del haz como su enfoque. Ambos controles no son absolutamente independientes entre sí como sería deseable, sino que el ajuste de uno se refleja sobre el del otro. En las buenas realizaciones este inconveniente no reviste mayor importancia.

b) La *pantalla fluorescente*. La cara anterior de la parte frontal del bulbo, aproximadamente plana, recubierta de material fluorescente, constituye la pantalla del tubo. Varias substancias ofrecen la particularidad de volverse luminosas, esto es, de emitir luz de color determinado cuando se las somete al bombardeo electrónico. Esas substancias se dice que son fluorescentes y reciben el nombre general de fósforos. Se utilizan fósforos diversos en la práctica, atendiendo a sus tres principales características: rendimiento luminoso, color y persistencia. El *rendimiento luminoso* se expresa por el poder luminoso (bujías) rendido por watt de potencia gastada para acelerar el haz; en la mayoría de los casos es de una bujía por watt, pero alcanza hasta 5 ó más en ciertos casos. (En las lámparas de alumbrado incandescente el rendimiento es de 1 ó 2 bujías por watt.) El *color* depende de la composición química del fósforo; los hay, principalmente, azules, verdes, rojizos y blancos; el blanco, exigido en televisión, se consigue por lo común con mezcla de fósforos de otros colores; el verde se prefiere en los labora-

torios, y el azul, por su capacidad para impresionar placas fotográficas del tipo pancromático (poder actínico o de ennegrecimiento), en los trabajos donde la imagen obtenida en la pantalla debe fotografiarse. Finalmente, la *persistencia* es la duración de la fluorescencia una vez extinguido el haz. Los fósforos se clasifican en fósforos de corta, de mediana o de larga persistencia. En televisión se usa el fósforo clasificado con P—4, de fluorescencia blanca y persistencia mediana. En el laboratorio se prefiere el P—1, verde de mediana persistencia, el P—11, azul de corta persistencia, o el P—7, verde-amarillento de larga persistencia.

c) El *sistema* deflector es el dispositivo que permite desviar el pincel electrónico de modo de llevarlo a incidir sobre, y por consiguiente a hacer fluorescer, cualquier punto de la pantalla. Por lo común, una parte de este sistema permite desviar horizontalmente el haz, y una segunda parte actúa en sentido vertical.

En la Fig. 41 se ilustra el sistema de deflexión llamado *electrostático*. Cada deflector consiste en un par de plaquitas paralelas entre sí o algo abiertas hacia la pantalla, entre las cuales se aplica la tensión

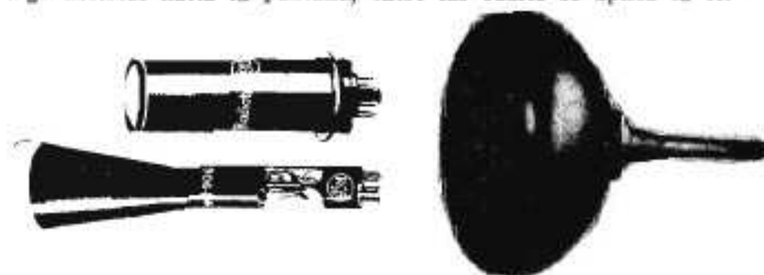


Fig. 42 – Varios tipos de tubos de rayos catódicos.

deflectora. Cuando una de las placas es positiva con respecto a la otra, la primera atrae a los electrones del pincel y éste se desvía correspondientemente. Si la tensión deflectora es alternada, el punto luminoso describirá entonces una línea luminosa recta en la pantalla. El segundo deflector trabaja en ángulo recto con el anterior. Combinando tensiones deflectoras horizontales con verticales, el punto se lleva a cualquier lugar de la pantalla. Y si esas tensiones son variables (alternadas) y están adecuadamente reguladas, se puede obtener que el extremo del pincel vaya explorando ordenadamente toda un área rectangular bien definida de la pantalla. Si la exploración se completa en un tiempo igual o menor que el de persistencia, toda esa superficie se verá iluminada. La intensidad de la iluminación depende de la intensidad del haz y ésta del potencial del electrodo de control. Si el potencial de control se varía durante la exploración, la iluminación de la superficie es desigual, con zonas más o menos brillantes u oscuras. En televisión se consigue de esta suerte reproducir sobre la pantalla la imagen captada por la *cámara de toma* del trasmisor.

Otro tipo de deflexión es el conocido como *electromagnético*. Usted sabe seguramente que los campos magnéticos actúan sobre las corrientes eléctricas imprimiendo sobre ellas y sus conductores una fuerza que es

proporcional al producto de la intensidad de la corriente por la intensidad del campo. En realidad no se trata de una acción sobre el conductor, como suele creerse, sino de una manifestación del principio de interacción entre el campo magnético y las cargas eléctricas en movimiento. El campo magnético *obra sobre los electrones* llevados por el conductor, aplicándoles una fuerza desviadora; como los electrones no pueden desprenderse del conductor, trasmiten esa fuerza a éste. La presencia del conductor no es de ningún modo necesaria para que esa fuerza se manifieste. Por eso, si nuestro pincel electrónico atraviesa un campo magnético, la acción de éste lo desvía. La dirección de la fuerza está siempre sobre una recta que es a la vez perpendicular a la que marca la dirección del movimiento de los electrones y a las líneas de inducción magnética del campo. El sentido de la desviación depende del sentido del campo. Invirtiendo el sentido del campo, se invierte el sentido de la desviación.

La deflexión magnética se consigue adicionando al tubo un par de bobinas deflectoras, dispuestas trasversalmente con respecto al haz, y por las cuales se hace circular la corriente que ha de producir el campo deflector. A veces una de las deflexiones se procura por el método electrostático, y la otra, por el magnético.

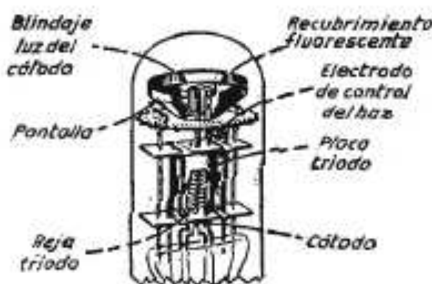


Fig. 43 – Construcción del ojo mágico con triodo amplificador.

La acción del campo magnético sobre el haz de electrones se usa también para lograr el enfoque del pincel. Se encontrarán así tubos con enfoque electrostático o con enfoque magnético y con deflexión electrostática o con deflexión electromagnética, o con deflexión mixta.

8.8 — Indicadores visuales (ojos mágicos). El ojo mágico u ojo eléctrico puede considerarse como un tubo de rayos catódicos en miniatura. Comprende por lo general dos partes: un *triodo amplificador* y la *sección visual*. La primera está formada por cátodo, reja y placa dispuestos en la forma habitual. La segunda, por un cátodo (unido al anterior), un electrodo de control de haz y una pantalla fluorescente. El cátodo de la segunda parte y la pantalla de forma cónica están dispuestos en tal forma que los electrones emitidos por el primero y acelerados por el potencial que se aplica a la segunda, excitan la fluorescencia del material que recubre a ésta. El electrodo de control catódico tiene forma de una laminilla aplicada con su lado más largo paralelo al cátodo, y su lado más corto coincidente con un radio que pasa por el centro del cátodo. La Fig. 43 ilustra esta disposición.

El electrodo de control viene así a proyectar su sombra sobre la pantalla, pues si es negativo con respecto a ésta desvía a los electrones que pasan por su proximidad. La "sombra" aparece como un sector oscuro en la pantalla, y su apertura o ángulo viene a depender del potencial del electrodo de control con respecto a la pantalla. La sombra desaparece cuando electrodo y pantalla están al mismo potencial, y alcanza 90 ó 100 grados cuando el primero es negativo. La Fig. 44 muestra la disposición esquemática del conjunto. El electrodo de control está unido internamente a la placa del triodo, y ésta, a su vez, pero por vía externa e interpuesta una resistencia elevada, a la pantalla. Entre el cátodo y la pantalla se aplica una diferencia de potencial fija. Observe ahora que cuando el triodo no conduce, no hay corriente por el resistor R, y el electrodo de control queda al mismo potencial que la pantalla, porque no hay caída de tensión en R. Por lo tanto, el ángulo de sombra es nulo. Suponga ahora que el triodo comience a conducir; hay corriente en R y caída de tensión; entonces el electrodo de control se hace negativo con respecto a la pantalla. Aparece sombra y su apertura dependerá de la corriente de placa del triodo. Ahora, como esta corriente depende del potencial de la reja del triodo con respecto a su cátodo, resulta que la tensión aplicada a la reja viene a controlar la apertura del ángulo de sombra. O, dicho en otros términos, el ángulo de sombra "mide" la tensión antedicha. El tubo es, por lo tanto, una especie de voltímetro "a sombra" y como tal se lo usa en sus diversas aplicaciones.

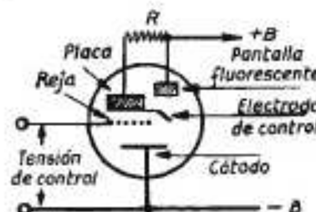


Fig. 44 – Circuito básico de utilización del ojo mágico. Los ojos mágicos que no incluyen el triodo amplificador se usan del mismo modo, obteniendo la amplificación por medio de un triodo separado.

Hay varios tipos de tubos de esta clase. Entre los americanos, por ejemplo, el 6E5 y el 6U5/6G5 son representativos. Hay también el tipo 6AF6G, que tiene dos sistemas catódicos pero que carece de triodo amplificador; los dos sistemas tienen en este caso diferente sensibilidad. Existen tubos europeos de semejantes características.

9. ¿QUÉ MÁS HAY QUE SABER SOBRE VÁLVULAS?

El autor ha releído cuidadosamente lo que antecede y lo ha depurado, agregando algunas cosas y suprimiendo otras. Ha procurado mantener un estilo amable porque prefiere exponer ideas propias y ajenas en una charla cordial, más bien que con la tesitura académica. Cree haber realizado una obra útil dentro de sus límites modestos y espera que usted lo crea así.

Pero se pregunta también ¿hay algo más que decir? Evidentemente puede contestar que sí. Posee a su disposición una copiosa biblioteca de la cual ha leído algunos volúmenes y relegado (¿por qué no confesarlo?) la mayor parte a un simple papel decorativo. Le gusta escribir y podría llenar muchas otras carillas con temas tal vez interesantes.

Hay muchas, muchísimas cosas que deberían decirse sobre las vál-

vulas. El inconveniente principal que se nos presentará si intentáramos extender este pequeño *volumen* consistiría en la necesidad de referirnos a las aplicaciones de las válvulas para poder juzgar con más certeza las aptitudes de tantos y tan variados tipos. El volumen crecería espantosamente y del útil amigo que pretende ser se transformaría en un enjundioso tratado. No. No es bueno cruzar el puente antes de llegar a él. Muchos aspectos de los tubos se comprenderán mejor cuando se estudie en detalle *cómo se usan*. El problema para el técnico está más en *saber utilizar* la válvula que en saber *cómo funciona*. Usted no quiere ser un especialista en válvulas sino en receptores, en amplificadores o en trasmisores. Es bueno que sepa distinguir *un triodo de* un pentodo, *es bueno que sepa* cuándo conviene usar uno u otro y es bueno que no confunda una base "octal" con una "loctal". Claro que para aprender a usar las válvulas se necesita conocer, en primer lugar, sus aptitudes y sus defectos generales. Después el detalle. Y esta idea ha sido rectora al trazar el plan del texto.

No quiere el autor, sin embargo, darle fin sin algunas otras observaciones. La mayoría de ellas las encontrará usted en su manual de válvulas, en la parte introductoria. Pero convendrá exponerlas aquí siquiera brevemente.

9.1 — *Tipos* y más tipos de válvulas. En el Manual RCA de válvulas receptoras figuraban en 1950 unos 400 tipos de válvulas de recepción. En el de válvulas trasmisoras, unos 120 tipos; más de 40 tipos de tubos de rayos catódicos en la sección correspondiente, más de 30 fototubos, unos 25 tiratrones e ignitrones y unos 80 tipos misceláneos. En total, alrededor de 700 tipos. En un manual Philips aparecen más de 250 tipos de recepción y tal vez otro tanto en las demás categorías. A esto hay que agregar que existen unas treinta diferentes "bases" americanas y otras tantas europeas. El balance es aterrador y habla muy poco en favor de los tantos *comités de normalización* que funcionan por ahí. Sea cual sea la razón de esta proliferación, la ignoramos. Tal vez, la parte más importante de ella, la explique el rápido desenvolvimiento de la técnica electrónica; pero también ha desempeñado su papel la competencia comercial, la que ha traído el afán de crear tipos nuevos para absorber el mercado. Las válvulas metálicas, por ejemplo, se presentaron como una revolución en la técnica electrónica; hoy día se van abandonando poco a poco; sobre una lista de 58 "tipos preferidos", sólo 13 son metálicas, la mayoría de las cuales tienen su equivalente en vidrio. Hoy la moda se inclina hacia el tipo "miniatura" o a la "técnica A" europea.

¿Cómo orientarse en este bosque frondoso? En primer lugar es necesario distinguir los tipos de válvulas para recepción de los de trasmisión, que son más grandes. Hay también los tubos de rayos catódicos, los tubos fotoeléctricos y los tiratrones e ignitrones. Sobre esto no puede haber confusión.

Concentrándonos sobre las válvulas de recepción, el primer punto importante es la tensión de calefacción del cátodo o la corriente de calefacción, según que se piense alimentar los calefactores en paralelo o en serie. Hay válvulas de 1,4; 2,0; 2,5; 2,8; 5; 6,3; 12,6; 25; 35; 50; 70; 117 volts...; y en cuanto a la selección de corrientes, hay tipos de 50, 60, 100, 150, 200, 300, etc., miliamperes.

En la designación del tipo se tiene en cuenta, en los americanos, la tensión de calefacción. Las designaciones que comienzan con la cifra 1, el calefactor es de 1,4 ó de 2 (¡) volts; la cifra 2 indica un calefactor de 2,5 volts; la 6 y la 7 corresponden a 6,3 volts, etc. No hay indicación de la corriente. En las válvulas Philips y otras europeas se sigue un criterio más inteligente: La primera letra de la designación indica o bien la tensión de calefacción cuando el tipo corresponde *a una familia* proyectada para *alimentar en paralelo*, o bien a la corriente cuando se lo ha previsto para alimentar en serie. Así:

A	significa	4	volts
C	"	200	mA
D	"	1,4	volts
E	"	6,3	"
G	"	5	"
K	"	2	"
U	"	100	mA

La EF9, la ECC40, *etc.*, son válvulas de 6,3 volts en el calefactor. La UCH41 es una válvula de 100 mA.

El primer paso en la elección de válvulas consiste, pues, en seleccionar el tipo de calefactor.

La mayoría de las válvulas de recepción tienen cátodo de calentamiento indirecto. Forma excepción importante el grupo 1 en la serie americana y D y K en la europea, en los que, prevista la alimentación con pilas o acumulador, se opta por el filamento directo debido a su mayor eficiencia.

Debe tenerse en cuenta que pueden esperarse *serias dificultades* cuando se trata *de calentar* estas válvulas con corriente alterna, si no se siguen exactamente las recomendaciones del fabricante.

Una válvula importante con cátodo directo de 2,5 volts es el triodo 2A3, preferido por los entusiastas de la alta fidelidad, y su equivalente 6B4-G, con 6,3 volts. Hay, sin embargo, el tipo 6A5-G, equivalente también, con cátodo de calefacción indirecta. Muchas rectificadoras tienen asimismo cátodo directo.

Viene después la función del tubo, que determina las aptitudes que debe poseer. Podríamos clasificarlos así:

a) Triodos de alto, mediano o *bajo* μ, para amplificación de tensión. *b*) *Pentodos* amplificadores de tensión, de corte próximo o remoto. *c*) Triodos amplificadores de potencia. *d*) Pentodos amplificadores de potencia. *e*) Conversoras y mezcladoras. *f*) Diodos. *g*) Tetrodos. *h*) Ojos mágicos. *i*) Varios.

Las designaciones americanas no tienen ninguna relación con el número de electrodos ni con la función de la válvula. En las europeas, en cambio, las letras que siguen a la primera indican aproximadamente la función básica de la válvula según la siguiente clave:

B — diodo o doble-diodo
C — triodo *amplificador* de tensión
F — pentodo " " "

H — hexodo o heptodo (válvula mezcladora)
K — octodo
L — pentodo amplificador de poder
M — ojo mágico
X — rectificadora de vapor de mercurio
Y — rectificadoras especiales
Z — rectificadora de alto vacío

Las letras pueden combinarse. Así ECC40 representa un doble triodo amplificador de tensión, de 6,3 volts en el calefactor. El número 40 es puramente cronológico. ECH35 es un triodo-hexodo; ECH41 es también un triodo-exodo, pero diferente y desarrollado con posterioridad.

Sigue después el asunto de las válvulas de vidrio, las metálicas y las miniaturas y sus diferentes tipos de bases. Actualmente se fabrican válvulas con bases octal, loctal y botón (miniatura), con preferencia, en los tipos americanos. Las bases de 4, 5, 6 y 7 patitas deben considerarse como anticuadas en los tipos de recepción, y los tubos que las llevan no deberían usarse en equipos nuevos, con la única excepción, posiblemente, del 2A3, que, sin embargo, creemos oportuno reemplazar por el 6B4-G con filamento de 6,3 volts y base octal. La base octal, caracterizada por la presencia de una espiga central con guía longitudinal, cuerpo de baquelita y la disponibilidad de un máximo de ocho patitas, apareció con las válvulas de envoltura metálica, pero ha sido adaptada también en las de vidrio, que en su designación llevan, en este caso, los sufijos G, GT o GT/G. Las patitas van numeradas de 1 al 8; las Nos. 2 y 7 corresponden casi siempre a las conexiones del calefactor; la Nº 8, al cátodo; la Nº 3, a la placa; la Nº 4, a la pantalla y la Nº 5, a la reja de control cuando ésta no va a un capacete superior; habiendo capacete de reja, la patita Nº 5 corresponde generalmente a la reja supresora. Esta disposición es la que se adopta para los triodos y los pentodos simples, pero uno no puede fiarse de ello porque hay importantes excepciones, como por ejemplo la 6SJ7 y la 6SK7, válvulas muy comunes, y la generalidad de los tipos compuestos. Seguramente deben haber existido poderosas razones para no seguir una regla que parece lógica además de sencilla.

En materia de bases, sigue luego el tipo loctal, o "lock-in", caracterizado porque las patitas emergen directamente de la base de vidrio y van blindadas entre sí por un vaso metálico que forma espiga central con guía y dispositivo de retención. Aquí se tiene por lo común: Nos 1 y 8, calefactor; Nº 2, placa; Nº 3, pantalla; Nº 4, supresora; Nº 5, sin conexión en los pentodos; Nº 6, reja de control. Hay excepciones importantes en los tipos compuestos. Son válvulas de 6,3 (primera cifra 7), de 12,6 (primera cifra 14) volts, o de 1,4 (1 L) volts en el calefactor. Hay también algunas de 50 volts, 150 miliamperes, que hacen juego con las de 12,6 volts.

Viene después la base miniatura o botón, con 7 patitas que salen directamente del cuerpo de vidrio de la válvula. Con ser el tipo de válvula más moderno, no hay regla fija en la disposición de las conexiones, salvo, posiblemente, la de reservar las patitas 3 y 4 para el calefactor, en los tipos de 6,3 volts, y las 1 y 7 en los tipos de 1,4 volts.

En cuanto a los bulbos, se usan actualmente el tipo ST de vidrio, con el extremo superior en forma de domo y que viene en diferentes tamaños: ST—12, ST—14, etc. Estos bulbos llevan a veces capacete en la parte superior para la conexión de reja; debe tenerse presente que hay dos tamaños de capacete en uso en las válvulas de recepción: el *miniatura* de 6 mm. de diámetro, y el *pequeño* de 9 mm. El bulbo de vidrio tipo T—9 es cada vez más común; se caracteriza por su forma tubular y se usa en válvulas derivadas del tipo metálico que llevan el sufijo GT o el GT/G, y en las de base loctal.

Las válvulas metálicas tienen bulbos de metal designados como MT o MTT; los primeros son cilíndricos; los segundos tienen un estrechamiento en la parte superior. Llevan siempre base octal y capacete miniatura cuando es el caso.

El bulbo de vidrio T-5 ½ es el de las válvulas miniatura; la base es del tipo botón de 7 patitas y nunca llevan (hasta ahora) capacete. Este tipo de válvula gana popularidad día por día gracias a su pequeño tamaño y las características sobresalientes de algunos de sus tipos, entre los cuales la mayoría de los triodos y pentodos tienen transconductancias del orden de 3 a 6000 micromhos, unidas a bajas capacitancias interelectródicas. (En televisión suele considerarse como factor de mérito del tubo usado en los amplificadores de videofrecuencia la relación g_m (μmhos) ÷ $(C_i + C_o)$ [1] (μμF). El factor del mérito más alto corresponde al pentodo miniatura 6AK5, con 750.)

En las válvulas del tipo europeo se encuentran bases del tipo octal, del tipo loctal, del tipo P caracterizado por la disposición radial de 8 patitas y las de las válvulas de "técnica A". Otras bases son menos usuales. Los bulbos son generalmente de vidrio, similares a los americanos ST y T. Es lamentable que no se haya incluído la base en la designación de los diferentes tipos.

9.2 — Especificaciones de las válvulas. Los fabricantes dan un grupo de especificaciones de valores límites o máximos de tensiones y corrientes en los distintos electrodos. En América se siguen, en general, las normas de la RMA (Radio Manufacturers' Association).

La capacidad de las válvulas para soportar tensiones, corrientes y potencias de disipación en los electrodos está limitada por diversos factores que no son del caso analizar aquí. El proyectista deberá respetar estas especificaciones máximas si quiere asegurar el promedio normal de vida útil de las válvulas que emplea.

Estas especificaciones máximas se dan, para los tubos de recepción, en una de dos formas: como *máximos absolutos* o como *valores centrales de proyecto*. Hay una diferencia importante entre ambas formas. Cuando se dan como máximos absolutos, los valores consignados no han de sobrepasarse en las condiciones comunes de uso del equipo. "Las condiciones comunes de uso" es una expresión más o menos vaga que significa lo siguiente: Si usted construye un receptor para alimentarlo con la red de 220 volts nominales, el receptor será usado en lugares donde por las variaciones propias de cualquier sistema de distribución

1 Véase el Apéndice.

podrá encontrarse con 240 volts o con 200 volts. El rendimiento de su receptor no deberá sufrir mayormente las consecuencias *de esta variación* de la tensión de alimentación ni sus válvulas deben pasar a mejor vida en breve tiempo por el simple hecho de que la tensión de la red aumentara en un 10 %. Ahora bien, si el fabricante dice que la especificación máxima absoluta de la tensión de placa es de 300 volts, y *usted ajusta su alimentación* de modo de tener esa tensión cuando en la red hay 220 volts, la válvula tendrá 330 volts en placa cuando la red suba a 240. La especificación ha sido excedida y la vida de la válvula se acorta. Lo que usted debió hacer es proyectar su equipo de modo de tener en placa 270 volts *con 220 en la red, de modo* que admitiendo condición común de uso que la red puede llegar a 240, su válvula no recibe más de 300 volts.

Las especificaciones máximas como valores centrales de proyecto, en cambio, ya tienen en cuenta la posibilidad *de la variación del 10 %* de la tensión de la red. Usted puede hacer los ajustes con 220 volts en la red, con la confianza de que nada pasará cuando la tensión suba a 240. La tendencia actual es la de dar especificaciones centrales, y los fabricantes van poco a poco cambiando sus hojas de datos. Así, por *ejemplo*, los manuales de válvulas autorizaban hace algunos años a usar como tensión de placa máxima de la 6L6, 400 volts. Era un máximo absoluto. Hoy se especifica 360 volts como valor central, lo que viene a ser exactamente lo mismo.

*Mayores datos acerca de la inter*pretación de los regímenes máximos los encontrará usted en su manual de válvulas. Es inútil repetirlos aquí.

Conviene, sin embargo, hacer notar que los regímenes máximos de las válvulas *trasmisoras se dan como* valores absolutos.

9-3 — Válvulas de transmisión[1]. El presente texto ha sido redactado teniendo especialmente a la vista los tipos de válvulas de recepción. Es claro *que los principios generales de funcion*amiento de las válvulas trasmisoras son los mismos que los expuestos aquí. Las diferencias entre las válvulas de trasmisión y las de recepción son más bien estructurales que de principio y nacen de la necesidad de realizar construcciones capaces de manejar tensiones y potencias cien*tos y a veces miles de ve*ces mayores.

Los problemas de construcción que por eso se presentan son realmente serios; sólo se los puede considerar como parcialmente resueltos en la actualidad, pero cabe esperar, sin duda, considerables perfeccionamientos en lo futuro.

No hay en los tubos trasmisores normas definidas en cuanto a formas, bases, cátodos, sistemas de refrigeración, etc., salvo, tal vez, en los tipos más chicos y modernos. El problema no es aún de normalizar sino que *sigue siendo el* de construir mejores válvulas.

9-4 — Transitores. El transitor tiende a desplazar, y lo ha hecho ya en medida considerable, a la válvula en muchas de sus aplicaciones. A

1 Véase "Manual de válvulas de transmisión", Arbó S. A. 1956. Buenos Aires.

pesar de *su creciente i*mportancia, no se ha considerado oportuno el desarrollo de la teoría y la práctica del transitor en este pequeño volumen, precisamente por no abultarlo demasiado y por considerar que existen algunas publicaciones en castellano sobre el tema al fácil alcance del lector[2].

2 Véase, por ejemplo, Rufus P. Turner "Transistores" - "Teoría y Práctica", Arbó S.A, Buenos Aires, y "Manual de Transistores", íd., íd.

APENDICE

Al desarrollar los temas sobre triodos y pentodos dejábamos ciertos aspectos muy importantes, que no nos atrevíamos a incluir, porque exigen el empleo de fórmulas algo más complicadas; esas fórmulas que tanto asustan a los estudiantes, en su iniciación, y que tan útiles resultan.

Finalmente resolvimos explicar en el Texto lo más indispensable y agregar al final este Apéndice, de estudio voluntario. Estamos seguros que a muchos les resultará interesante y útil.

Hemos respetado la numeración de capítulos y párrafos, conservando la ilación del tema y para mayor facilidad de quienes quieran aprovecharlos.

* 6. EL TRIODO EN LOS CIRCUITOS

6.5 — Circuito del triodo. Exactamente como ocurre con el diodo, aplicar voltajes fijos a los electrodos del triodo no conduce a otra cosa que a la realización de entretenidos experimentos, los cuales, en definitiva, nos muestran cómo reacciona el tubo al cambiar los potenciales aplicados. El triodo empieza a ser útil cuando se lo usa para controlar la corriente en una *carga*, gracias a las propiedades de sensibilidad y ligereza que ya se han hecho resaltar.

Para ilustrar estas ventajas basta citar un ejemplo de aplicación. Supongamos que se desea mantener constante la temperatura de un horno eléctrico, dentro, digamos, de un décimo de grado. Se podría lograr esta regulación "a mano". Por ejemplo, un operario observa la indicación de un termómetro colocado dentro del horno, el cual se supone que quiere mantenerse a una temperatura comprendida entre 60,0° y 60,1°. El horno se calienta por medio del calor de Joule desarrollado en unos resistores, tal como se hace en la cocina eléctrica. Cuando el operario observa que se alcanza el límite superior de temperatura (60,1°) corta la corriente. El horno comienza a enfriarse; el operario restablece la conexión al alcanzarse el límite inferior (60,0°), y así sucesivamente. Se comprende que la función del operario resulta extremadamente fatigosa y sujeta a errores que pueden tener serias consecuencias. La Fig. 45 ilustra una solución mucho más económica y eficiente.

El circuito de los resistores de calefacción se controla por medio de un relé o relevador, cuyos contactos *a* y *b* están cerrados cuando no hay corriente en la bobina *d* de excitación. Esta bobina está intercalada en el circuito de placa del triodo *T*, al cual se aplican los voltajes de placa E_{bb} y de reja E_{cc}, este último suficientemente negativo como para llevar a cero la corriente de placa. El termómetro que muestra la figura va dentro del horno y lleva un contacto con punta de platino, justamente en el nivel que el mercurio alcanza cuando la temperatura es de 60,1°. Este contacto está unido a la reja del tubo; a su vez, la masa del mercurio (¡un metal líquido conductor!) se une al cátodo mediante la conexión que se muestra. El funcionamiento del

aparato es muy simple: cuando la temperatura del horno es inferior a 60,1°, la tensión E_{cc} está aplicada a la reja del triodo, a través del resistor *R*. No hay corriente en el triodo, el relevador está desexcitado, los contactos *a* y *b* están cerrados y el circuito de calefacción también cerrado. El horno se calienta. Cuando la temperatura alcanza los 60,1°, el contacto del termómetro se cierra, la reja se pone en conexión directa con el cátodo de modo que su potencial se reduce a cero, el tubo conduce, el relé se excita, los contactos *ab* se abren, la calefacción se interrumpe. El horno empieza a enfriarse, el contacto de mercurio se abre, la reja vuelve a hacerse negativa, etc. El resistor *R*, que puede hacerse grande como se quiera, tiene por objeto evitar que el contacto de mercurio ponga en cortocircuito a la batería de reja. El capacitor *C* llena una función auxiliar: impide que la reja alcance instantáneamente el potencial E_{cc} al abrirse el contacto debido a que toma cierto tiempo para cargarse. De este modo se permite que la columna mercurial baje un poco antes de restablecerse la calefacción; de lo contrario podría ocurrir "tableteo" en el relé a causa de que apenas interrumpido el circuito termométrico se cierra el circuito de calefacción, para volver a abrirse en seguida, al cabo de un ciclo de duración tal vez excesivamente corta.

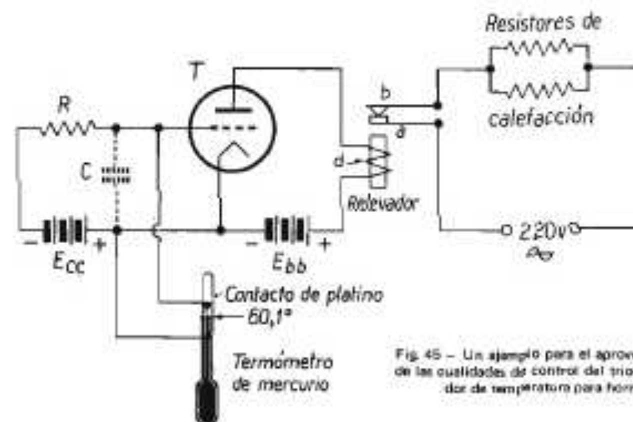


Fig. 45 – Un ejemplo para el aprovechamiento de las cualidades de control del triodo. Regulador de temperatura para hornos.

Con este dispositivo, el termómetro puede hacerse muy sensible (columna mercurial fina), ya que su contacto no lleva sino una corriente que puede hacerse del orden del microampere. No sería posible con un termómetro de esta clase controlar directamente el relé ni mucho menos el circuito de calefacción.

Para estudiar al detalle el funcionamiento del triodo cuando su circuito de placa está cargado, conviene considerar el circuito básico de la Fig. 46, donde la carga está constituida por un resistor R_b. La disposición del circuito de placa es análoga a la que utilizamos en el caso del diodo (Fig. 12). Como entonces, se tiene que el potencial de la placa con respecto al cátodo es

$$e_b = E_{bb} - e_R$$
$$e_b = E_{bb} - i_b \cdot R_b \qquad (9)$$

También es fácil ver que el potencial e_c de la reja con respecto al cátodo es

$$e_c = -E_{cc} + e_g \qquad (10)$$

es decir, está compuesto por una parte fija, $-E_{cc}$, que se llama *tensión de polarización de reja* y una parte variable e_g.

El problema que queremos resolver consiste en determinar la corriente i_b y el potencial e_b de placa, supuesto conocidos E_{bb}, $-E_{cc}$, e_g y R_b. Como antes, la dificultad radica en que e_b e i_b dependen la una de la otra, según lo indica la ecuación (9). Se resuelve también del mismo modo. Sobre las características voltaje de placa-corriente de placa correspondientes al triodo en cuestión, se traza la *línea de carga* (Fig. 47) con el mismo procedimiento aplicado en el caso del diodo (¡véase!). Sabemos que todos los pares de valores de e_b, i_b, posibles en la instalación corresponden necesariamente a puntos de la línea de carga. Sea ahora $e_g = 0$; entonces es

$$e_c = -E_{cc} + e_g = E_{cc} + 0 = -E_{cc}$$

Por lo tanto, los pares de valores posibles de e_b, i_b deben encontrarse *también* sobre la curva $e_c = -E_{cc}$, del mismo modo como en el diodo debían hallarse sobre la única curva que nos bastó en aquella ocasión para representar sus propiedades. Se concluye que sólo puede existir el par de valores que corresponden al punto Q, de la figura, intersección de la línea de carga y de la curva $e_c = -E_{cc}$. Es decir, tenemos

$$e_b = E_{bo}$$
$$i_b = I_{bo}$$

cuyos valores en volts y en miliamperes se leerán sobre los ejes.

¿Qué pasará ahora si damos a e_g el valor de 1 volt positivo? Veamos. Se tiene

$$e_c = -E_{cc} + e_g = -E_{cc} + 1$$

Los pares de valores posibles deben encontrarse sobre la curva que tiene esta misma designación en la figura. Por necesitar encontrarse al mismo tiempo sobre la línea de carga, el único par posible es el que corresponde al punto A, es decir, será ahora

$$e_b = e_{bA}$$
$$i_b = i_{bA}$$

De igual modo, si se hace e_g ***negativo*** e igual en magnitud a 1 volt ($e_g = -1$), se tiene

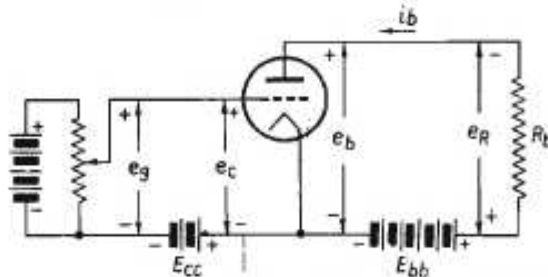


Fig. 46 – Circuito de utilización básico del triodo. Compárese con el diodo, Fig. 12.

$$e_c = -E_{cc} + e_g = -E_{cc} + (-1) = -E_{cc} - 1$$

El par de valores posible corresponde al punto B, o, lo que es lo mismo, a $e_b = e_{bB}$, e $i_b = i_{bB}$.

Se comprende que del mismo modo puede determinarse corriente y

tensión para cualquier valor positivo o negativo de e_g, dentro, por supuesto, de los límites que permite el juego de curvas disponibles.

EJERCICIO. Un triodo 6J5 se coloca en el circuito de la Fig. 46, con $E_{bb} = 320$ volts, $-E_{cc} = -8$ volts y $R_b = 20\,000$ ohms. Determine sobre las características de la Fig. 23 la corriente de placa que corresponde a los valores de e_g iguales, sucesivamente, a 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 volts positivos, y después a la misma serie de valores negativos.

OTRO. Sobre un papel cuadriculado trace un par de ejes en ángulo recto y márquelos: i_b el vertical y e_b *el horizontal*. Sobre este último, *hacia la izquierda* (vea la Fig. 22 para orientarse), marque valores de e_c entre 0 y -16 volts. Sobre el vertical, valores de i_b de 0 a 16 miliamperes. Represente ahora los pares de valores de e_c, i_b obtenidos en el ejercicio anterior (¡tenga en cuenta que $e_c = E_{cc} + e_g$!) y una los puntos resultantes con una curva de inflexiones suaves. Esa curva es la *característica dinámica de transferencia* del triodo 6J5 para $E_{bb} = 400$ volts y $R_b = 20\,000$ ohms.

OTRO. Repita los ejercicios anteriores, sucesivamente, con $R_b = 10\,000$ ohms, $R_b = 40\,000$ ohms, $R_b = 80\,000$ ohms y $R_b = 160\,000$ ohms. Trace las características dinámicas correspondientes sobre los mismos ejes que empleó en el ejercicio anterior y anote sobre cada una de ellas el valor de R_b que le corresponde. Compare las cuatro curvas entre sí y anote sus observaciones al pie de la figura. ¿Cuál de las curvas es más inclinada? ¿Cuál de ellas se aproxima más a una recta?

PRÁCTICA. Si usted se halla en condiciones de hacerlo, realice el montaje de la Fig. 46 agregando un miliamperímetro de 0-15 mA, más o menos, en serie con R_b (donde está la flecha de i_b); un voltímetro de 0-500 (mejor con alcance variable y de alta resistencia interna) entre la placa y el cátodo (donde está la flecha de e_b. Atención con las polaridades) y otro voltímetro de 0-20 volts donde está la flecha de e_g. Varíe e_g como en el primer ejercicio y anote los valores de i_b. Compare con los que obtuvo gráficamente en el ejercicio anterior. Pero asegúrese que E_{bb} y E_{cc} tengan los mismos valores que admitió entonces.

6.6 — Teorema del circuito equivalente de placa. En muchas de las aplicaciones del triodo, más que los valores totales de e_b, de e_c y de i_b, interesan *sus variaciones* y la relación que entre ellos existen. Y todavía en una gran parte de los casos prácticos, las variaciones que interesan (¡los Δ!) son *pequeñas* comparadas con los valores totales. Al decir *pequeñas* queremos decir que tales variaciones son al menos varias veces menores que los valores totales.

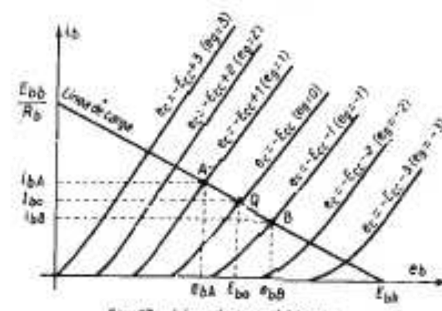


Fig. 47 – Línea de carga del triodo.

Evidentemente, tales variaciones se pueden calcular del modo que acabamos de explicar; pero *afortunadamente* ocurre que es posible obtener una *fórmula* que vincule esas variaciones no sólo entre sí sino también con R_b, de modo que conocida y sabiéndola aplicar nos ahorraremos el trabajo que supone el trazado de la línea de carga y la lectura gráfica de valores. Es en esta fórmula donde se comprende la utilidad de los factores variacionales del triodo.

Para obtener algo tan interesante vale la pena que nos dispongamos a

hacer un pequeño esfuerzo para comprender *cabalmente* lo que sigue, es decir, la demostración de la validez de la fórmula que se da más adelante distinguida con el número (19b).

La Fig. 48 es la misma que la 47, sólo que se han dibujado menos curvas para hacerla más clara. Cuando el voltaje total de reja (e_c en la Fig. 46) es igual a $-E_{cc}$, la corriente i_b adopta el valor I_{bo} y la tensión e_b el valor E_{bo}, valores que corresponden al punto Q. Ahora bien, si aplicamos a e_c una variación positiva Δe_c, pasamos la curva $e_c = -E_{cc} + \Delta e_c$ (punto B), y los valores de corriente y de tensión adoptan los nuevos valores i_{bB} y e_{bB}. Ha habido variación de corriente y de tensión que podríamos calcular restando a los valores nuevos los antiguos. La variación de la corriente, que llamaremos Δi_b, es, evidentemente (interprétese la figura),

$$\Delta i_b = i_{bB} - I_{bo} \qquad (11)$$

y la variación de la tensión, a llamarse Δe_b,

$$\Delta e_b = e_{bB} - E_{bo} \qquad (12)$$

Nótese que la corriente ha aumentado (i_{bB} es mayor que I_{bo}), mientras que el voltaje ha disminuído (e_{bB} es menor que E_{bo}). Las fórmulas (11) y (12) dan cuenta de este hecho, porque en la primera la resta indicada nos dará un número positivo o al reemplazar valores. Así Δi_b resulta una variación *positiva* (en aumento), es decir, del mismo sentido (signo) que Δe_c. En cambio, en la segunda, la resta da un número negativo, lo que expresa que Δe_b es una variación negativa (una disminución), esto es, de sentido (signo) opuesto al de Δe_c.

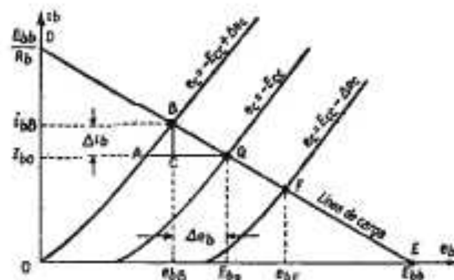


Fig. 48 — Ilustración de las relaciones variacionales del triodo (teorema del circuito equivalente de placa).

Observemos ahora en la figura un hecho evidente. El segmento $\overline{AQ}$ es igual a la suma del $\overline{AC}$ y del $\overline{CQ}$. Digámoslo con una ecuación

$$\overline{AQ} = \overline{AC} + \overline{CQ} \qquad (13)$$

Notemos también que el cociente $\overline{CB} \div \overline{AC}$ da la inclinación de la curva $e_c = -E_{cc} + \Delta e_c$, es decir, lo que hemos llamado conductancia de placa y designado con el símbolo g_p. Luego

$$\frac{\overline{CB}}{\overline{AC}} = g$$

Y como r_p, la resistencia de placa, es la recíproca de la conductancia, resulta

$$\frac{\overline{AC}}{\overline{CB}} = r_p$$

de donde se deduce que

$$\overline{AC} = r_p \, . \, \overline{CB}$$

Pero fíjese que CB no es otra cosa que Δi_b. Entonces

$$\overline{AC} = r_p \, . \, \Delta i_b \qquad (14)$$

Tomemos ahora CQ. Y observemos que el cociente CB ÷ CQ es la inclinación de la línea de carga. Pero esta inclinación está también medida por el cociente OD ÷ OE. Entonces

$$\frac{\overline{CB}}{\overline{CQ}} = \frac{\overline{OD}}{\overline{OE}}$$

Si invertimos las dos cantidades igualadas en esta ecuación, se tiene

$$\frac{\overline{CQ}}{\overline{CB}} = \frac{\overline{OE}}{\overline{OD}} \qquad (15)$$

Pero $\overline{OE} = E_{bb}$, y $\overline{OD} = E_{bb} \div R_b$. Entonces

$$\frac{\overline{OE}}{\overline{OD}} = \frac{E_{bb}}{\dfrac{E_{bb}}{R_b}} = R_b$$

Por poca álgebra que se sepa, se comprenderá que el cociente de $E_{bb} \div (E_{bb}/R_b)$ es igual a R_b, como lo hemos puesto.

Retomando la ecuación (15), resulta ahora

$$\frac{\overline{CQ}}{\overline{CB}} = R_b$$

de donde se deduce que

$$\overline{CQ} = R_b \, . \, \overline{CB}$$

y como ya sabemos que $\overline{CB} = \Delta i_b$,

$$\overline{CQ} = R_b \, \Delta i_b \qquad (16)$$

Tenemos así valores nuevos para $\overline{AC}$ y para $\overline{CQ}$. Introduciendo estos valores en la ecuación (13), resulta

$$\overline{AQ} = \overline{AC} + \overline{CQ} = r_p \, . \, \Delta i_b + R_b \, . \, \Delta i_b$$

que es lo mismo que escribir

$$\overline{AQ} = (r_p + R_b) \, \Delta i_b \qquad (17)$$

Tomemos ahora AQ. Es la distancia horizontal entre las curvas que corresponden a $e_c = E_{cc}$ y a $e_c = -E_{cc} + \Delta e_c$. La distancia entre curvas que corresponden a voltajes separados de 1 volt será (vea definición del factor de amplificación):

$$\frac{\overline{AQ}}{\Delta e_c} = \mu \qquad (18a)$$

de donde se deduce que

$$\overline{AQ} = \mu \cdot \Delta e_c \qquad (18b)$$

Introduzcamos este valor en la ecuación (17):

$$\mu \cdot \Delta e_c = (r_p + R_b)\, \Delta i_b \qquad (19a)$$

y de aquí que

$$\Delta i_b = \frac{\mu \cdot \Delta e_c}{r_p + R_b} \qquad (19b)$$

que es una relación que vincula Δi_b con Δe_c y R_b (además de los factores del triodo), tal como nos propusimos encontrar.

Posiblemente usted habrá encontrado la demostración ¡un poco difícil! Pero vaya un consejo. Si usted no conoce suficiente álgebra como para seguir lo que hemos hecho, es bueno que de una vez por todas se decida a aprenderla. Sinceramente, tenemos una gran confianza en sus dotes naturales, pero dudamos que pueda ir muy lejos en su profesión sin saber un poco de álgebra. Hemos querido hacerle observar cómo las fórmulas no son sino la expresión abreviada de hechos. Ninguna fórmula puede expresar nada que no pueda decirse con palabras, pero ofrecen un lenguaje mucho más breve y conciso, permiten hacer combinaciones y sacar conclusiones que serían sumamente dificultosas (¡no imposibles!) al emplear el lenguaje común. Estamos seguros que para desempeñarse eficientemente en radio no se necesita ser un matemático, pero hay un mínimo que es necesario conocer. Muchos libros de radio están llenos de fórmulas; tener muchas fórmulas no es indicio de que el libro sea bueno; en muchos casos es pura hojarasca que no hace otra cosa que esconder el tronco y las ramas más gruesas, que son lo esencial. Pero haga una prueba: trate de repetir la demostración anterior empleando solamente palabras; vea cuántas páginas necesita. Sacará como conclusión que las fórmulas, aplicadas con criterio sano, son buenas y que conviene saber manejarlas.

Las fórmulas (19) que acabamos de obtener tienen un nombre impresionante: *teorema del circuito equivalente de placa.* En la mayoría de los textos se recurre al *cálculo diferencial* para demostrarlo, cuyos fundamentos son uno de los capítulos más importantes de las matemáticas. El *cálculo diferencial* trata de establecer relaciones entre *diferencias*, es decir, *variaciones*. No otra cosa hemos hecho. Nos ocurre tal vez como a aquel personaje de Molière que descubrió que hacía prosa sin saberlo. Nosotros venimos haciendo cálculo diferencial sin darnos cuenta. En la vida práctica se hace cálculo diferencial sin pensarlo. Y es lógico que sea así, porque nunca se hubiera inventado el cálculo diferencial si no hubiera aparecido su necesidad para sistematizar y perfeccionar métodos ya conocidos. Los egipcios aplicaron el *teorema de Pitágoras* en la construcción de las pirámides ¡tal vez 2000 o más años antes de que Pitágoras naciera! Volvamos a nuestra fórmula y tratemos de aplicarla al siguiente.

EJEMPLO. Calcular la variación de la corriente de placa que se produce en un triodo 6J5 cuando la tensión de reja se aumenta en 1,8 volts y suponiendo que la resistencia de carga es de 30 000 ohms. El triodo funciona en condiciones tales que su resistencia de placa es de 7700 ohms y factor de amplificación 20.

SOLUCIÓN. Escribiendo en la fórmula (19*b*), $\mu = 20$, $\Delta e_c = 1{,}8$; $r_p = 7700$, $R_b = 30\,000$, resulta

$$\Delta i_b = \frac{20 \times 1{,}8}{7700 + 30\,000} = \frac{36}{37\,700} \cong 0{,}00096 \text{ Amp.}$$

es decir

$$\Delta i_b = 0{,}96 \text{ mA}$$

Obsérvese que si se hubiera disminuido la tensión de reja en 1,8 volts en lugar de aumentarla, deberíamos haber puesto $\Delta e_c = -1{,}8$ y habríamos obtenido

$$\Delta i_b = -0{,}96 \text{ mA}$$

es decir, una disminución de la corriente (variación negativa).

Nos falta calcular Δe_b. Para ello podemos recurrir a la ecuación (16), que dejamos al pasar en nuestra demostración, observando que $CQ = \Delta e_b$ en la figura.

Entonces

$$\Delta e_b = R_b \cdot \Delta i_b$$

Pero el voltaje de placa disminuye cuando la corriente aumenta. Por lo tanto, para que la fórmula no conduzca a situaciones confusas, corrijámosla escribiendo

$$\Delta e_b = -R_b \cdot \Delta i_b \qquad (20)$$

Como sabemos calcular Δi_b con la fórmula (19b), pongamos para poder obtener de una vez Δe_b,

$$\Delta e_b = -\frac{\mu\, \Delta e_c}{r_p + R_b} R_b \qquad (21)$$

EJEMPLO. En el caso tratado en el ejemplo anterior se tiene

$$\Delta e_b = -\frac{20 \times 1{,}8}{7700 \times 30\,000} \times 30\,000 = -0{,}00096 \times 30\,000 = -28{,}8 \text{ volts.}$$

A una variación positiva de 1,8 volts en reja corresponde entonces una variación negativa de 28,8 volts de la tensión de placa.

6.7 — Limitaciones de la validez del teorema del circuito equivalente de placa. Las aplicaciones de las fórmulas (19) y (21) están limitadas en cuanto a la exactitud de los resultados que arrojan a causa de la presencia en ellas de los factores μ y r_p. En efecto, al introducir r_p hicimos notar que su valor, que mide la recíproca de la inclinación de las curvas, depende de la región de las características que se considere, dado que dichas curvas tienen diferentes inclinaciones en diferentes lugares. Entonces, si las variaciones de e_c que se toman en cuenta son muy grandes, puede ocurrir que el punto *Q* del cual se parte y el punto *R* al cual se llega (Fig. 48) se encuentren en lugares donde las inclinaciones sean bastante diferentes entre sí. Por lo tanto, ¿qué valor de r_p pondremos en la fórmula? Se ve que ésta no toma en cuenta el carácter variable de r_p y que, por lo tanto, no puede servir cuando las variaciones de e_c que se consideren son bastante grandes como para que las diferencias de inclinación sean notables. Esto no significa que la fórmula deba desecharse en cuanto Δe_c exceda de, digamos, 1 ó 2 volts; lo único importante es que el resultado de la fórmula es tanto más exacto cuanto más pequeño sea Δe_c.

En cuanto a μ, esto es, la distancia horizontal entre las curvas, no

debe preocuparnos mayormente, porque es más o menos el mismo en toda el área cubierta por las características.

En consecuencia, al aplicar el teorema del circuito equivalente de placa, esto es, las fórmulas (19) y (21), tomaremos las siguientes precauciones:

1º Poner en las fórmulas los valores de μ y r_p que corresponden al punto Q de partida.

2º Considerar "*exactos*" los resultados sólo para valores muy pequeños de Δe_c. Para valores mayores, hay un error a causa de la variación de r_p (y eventualmente de μ).

3º El error a que se hace referencia en 2º no tiene mayor importancia siempre que la variación de Δe_c no sea tan grande como para hacer positiva la reja ni, cuando es negativa, como para llevar $e_c = - E_{cc} + \Delta e_c$ a un valor demasiado próximo al cociente $-E_{bb} \div \mu$. Por ejemplo, en el caso de la 6J5 ($\mu = 20$) suponiendo que el punto Q esté sobre la curva $e_c = -6$ volts, y que la tensión de placa E_{bb} sea de 320 volts, el teorema da resultados razonables cuando Δe_c se limita, en sentido positivo, a 6 volts y en sentido negativo a -9 volts. (En efecto, $-E_{bb} \div \div \mu = -320 \div 20 = -16$ volts; $-E_{cc} + \Delta e_c$, con $\Delta e_c = -9$ volts da $-6 + (-9) = -15$ volts).

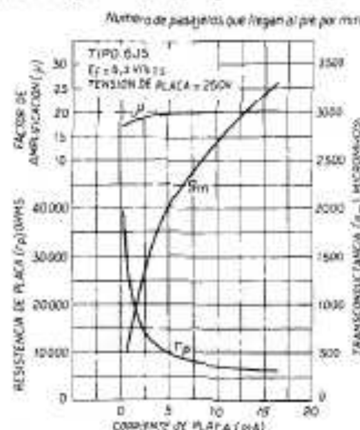


Fig. 49 – Variación de μ, r_p y g_m en el triodo 6J5.

Para el uso de este teorema, son útiles las curvas que muestran cómo varían μ, r_p, g_m, con la corriente de placa, porque evitan la necesidad de calcular los factores en cada caso. Estas curvas son suministradas por los fabricantes; en la Fig. 49 se reproducen las que corresponden a la 6J5.

EJEMPLO. Un triodo 6J5 se utiliza en condiciones tales de tensión que con 10 000 ohms de carga la corriente es de 5 mA. ¿Cuál es la corriente de placa cuando la tensión de reja se aumenta en 2 volts? ¿Cuál es la variación de la tensión de placa?

SOLUCIÓN. Según las curvas de la Fig. 49, con 5 mA la resistencia de placa es de 10 000 ohms, y $\mu = 20$. Con estos valores y $R_b = 10\,000$ ohms, se tiene, aplicando la fórmula (19 *b*):

$$\Delta i_b = \frac{20 \times 2}{10\,000 + 10\,000} = \frac{40}{20\,000} = 0{,}002 \text{ Amp.}$$

$$\Delta i_b = 2 \text{ mA}$$

Y también, con la fórmula (20):

$$\Delta e_b = -\Delta i_b \,.\, R_b = -0{,}002 \times 10\,000 = -20 \text{ volts}$$

6.8 — El triodo con variaciones de tensión senoidales aplicadas a la reja. Consideremos el circuito de la Fig. 50. Es semejante al de la Fig. 46, pero en lugar del dispositivo potenciométrico usado en esta

última para obtener los Δe_c, se supone que hay intercalado un generador de tensión alterna que proporciona una tensión senoidal.

$$e_g = \sqrt{2}\, E_g \cos 2\pi ft \qquad (22)$$

donde E_g es el *valor eficaz* de la tensión y $\sqrt{2}\, E_g$ el valor **máximo.** Esta tensión se suma como antes a la de la batería de reja para dar la tensión total de reja.

$$e_c = -E_{cc} + \sqrt{2}\, E_g \cos 2\pi ft \qquad (23)$$

La tensión total de reja varía entonces de modo continuo entre los valores extremos

$$e_c = -E_{cc} + \sqrt{2}\, E_g$$

(cuando $\cos 2\pi ft = 1$, es decir, en el instante $t = 0$, por ejemplo) y

$$e_c = -E_{cc} - \sqrt{2}\, E_g$$

(cuando $\cos 2\pi ft = -1$, es decir, en el instante $t = \dfrac{1}{2f}$, por ejemplo)

La función de Δe_c está entonces desempeñada por el término variable $\sqrt{2E_g} \cos 2\pi ft$. Es decir, se tiene

$$\Delta e_c = e_g = \sqrt{2}\, E_g \cos 2\pi ft \qquad (24)$$

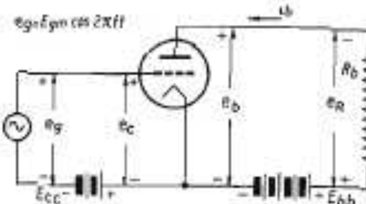


Fig. 50 – Circuito de utilización del triodo con excitación senoidal.

Δi_b variará entonces con el variar de Δe_c. Si quisiéramos ver cómo varía Δi_b al transcurrir el tiempo, podríamos calcular con la fórmula (24) el valor de Δe_c que corresponde a cada instante t que nos interese. Los valores de Δe_c así obtenidos se reemplazan en la fórmula (19b) y con ésta se calculan los valores correspondientes de Δi_b. Se comprende, con un pequeño esfuerzo de imaginación, que los mismos resultados se obtendrán si substituímos Δe_c en la fórmula (19b) por $\sqrt{2}\, E_g \cos 2\pi ft$, se tiene entonces

$$\Delta i_b = \frac{\mu \sqrt{2}\, E_g}{r_p + R_b} \cos 2\pi ft \qquad (25)$$

Si esta expresión es válida, resulta que Δi_b varía también senoidalmente, siguiendo la *misma ley* que Δe_c.

En esta afirmación hay algo implícito que conviene aclarar desde ya. Y es que supone que la corriente de placa responde *instantáneamente* a las variaciones de la tensión de reja. Vimos ya que tal hipótesis es razonable dada la ligereza de los electrones, aunque no es *válida* de un modo absoluto. El tiempo que la corriente de placa tarda en responder a las variaciones de reja es del orden de 10^{-8} seg., es decir, de una

cienmillonésima de segundo. Esto es tan rápido que no trae mayores inconvenientes el aplicar la ecuación (25) mientras la frecuencia f *sea menor*, digamos, que unos 10 000 000 de ciclos por segundo (10 megaciclos). Para frecuencias de 20 megaciclos y mayores, hay un retardo apreciable entre las variaciones de i_b y las de e_c, tan importante que obliga a emplear triodos de construcción especial y hasta desechar este tipo de válvulas para reemplazarlas por otras de distinto funcionamiento, tales como las llamadas klistron, magnetrón, etc.

Para simplificar la notación podemos escribir $i_p = \Delta i_b$.

Por lo tanto, se tiene

$$i_p = \frac{\mu}{r_p + R_b} \sqrt{2}\, E_g \cos 2\pi ft \qquad (26a)$$

Para dar a la expresión de i_p la forma habitual en corrientes alternas,

$$I_p = \frac{\mu E_g}{r_p + R_b} \qquad (27)$$

Por lo tanto

$$i_p = \sqrt{2}\, I_p \cos 2\pi ft \qquad (26b)$$

donde I_p adopta el significado de *valor efectivo* de las variaciones senoidales $i_p = \Delta i_b$ de la corriente de placa.

Cuando, pues, se aplica a la reja del triodo una tensión alterna senoidal, la corriente de placa sufre también una variación alterna senoidal. El valor eficaz I_p de esta variación está ligado al valor eficaz de la tensión alterna aplicada en reja por la ecuación (27).

Del mismo modo podríamos calcular las variaciones Δe_b de la tensión de placa. Poniendo $\Delta e_c = \sqrt{2}\, E_g \cos 2\pi ft$ en la ecuación (21) tenemos

$$\Delta e_b = -\frac{\mu \cdot R_b \cdot \sqrt{2}\, E_g}{r_p + R_b} \cos 2\pi ft \qquad (28)$$

Si se tiene en cuenta la sencilla relación trigonométrica

$$\cos(\alpha - \pi) = -\cos \alpha$$

la ecuación (28) podrá escribirse

$$\Delta e_b = \frac{\mu R_b}{r_p + R_b} \sqrt{2}\, E_g \cos(2\pi ft - \pi) \qquad (29)$$

Y si escribimos $e_p = \Delta e_b$, obtenemos

$$e_p = \frac{\mu R_b}{r_p + R_b} \sqrt{2}\, E_g \cos(2\pi ft - \pi) \qquad (30)$$

Las variaciones de la tensión de placa son también senoidales, pero están atrasadas de un ángulo π, es decir, en medio período con respecto a las de la tensión de reja. Podemos, finalmente, escribir

$$E_p = \frac{\mu R_b}{r_p + R_b} E_g \qquad (31)$$

con lo cual daremos a e_p la expresión usual de las tensiones alternadas:

$$e_p = \sqrt{2}\, E_p \cos(2\pi ft - \pi) \qquad (32)$$

donde E_p adopta el carácter de *valor efectivo* de e_p y $\sqrt{2}\, E_p$ el de *valor máximo* o de *cresta*.

Las variaciones de i_p y e_p, respectivamente, de la corriente y de la tensión de placa se llaman también las *componentes alternas* de éstas.

Ejemplo. A la reja de un triodo 6SF5, que funciona de tal modo que $\mu = 100$, $r_p = 70\,000$ ohms y $R_b = 130\,000$ ohms, se aplica una tensión alternada de 1,2 volts eficaces y de frecuencia igual a 796 ciclos por segundo. Expresar las componentes alternas i_p y e_p de la corriente y de la tensión de placa.

Solución. Expresando la tensión aplicada a la reja en la forma general de la ecuación (22), se tiene:

$$e_g = \sqrt{2} \times 1{,}2 \times \cos 5000\, t$$

Puesto que $2\pi \times 796 = 5000$.

Por la ecuación (26a) se tiene entonces

$$i_p = \frac{100}{70\,000 + 130\,000} \sqrt{2} \times 1{,}2 \times \cos 5000\, t$$

$$i_p = \sqrt{2} \times 0{,}0006 \cos 5000\, t \text{ amperes}$$

Del mismo modo se tiene por la ecuación (30):

$$e_p = \frac{100 \times 130\,000}{70\,000 + 130\,000} \sqrt{2} \times 1{,}2 \times \cos(5000\, t - \pi)$$

y, efectuando los cálculos,

$$e_p = \sqrt{2} \times 78 \times \cos(5000\, t - \pi) \text{ volts}$$

Los valores efectivos, que podrían calcularse con las ecuaciones (27) y (31) respectivamente, resultan:

$$I_p = 0{,}0006 \text{ amperes}$$
$$E_p = 78 \text{ volts}$$

6.9 — Amplificación. Notemos que en el ejercicio anterior una variación senoidal de tensión de 1,2 volts eficaces da lugar a la aparición de una variación de tensión de placa también senoidal pero de 78 volts como valor eficaz. Esta transformación de las variaciones de tensión aplicadas a la reja en otras mayores, pero de igual forma de onda, en el circuito de placa es un aspecto de la propiedad *amplificadora* de los triodos. La onda de tensión aplicada a la reja ha sido aumentada o amplificada, en este caso 78 ÷ 1,2 = 65 veces. Este *cociente, del valor efectivo de la tensión de placa dividida por el valor efectivo de la variación de la tensión de reja*, se llama *amplificación de tensión* o *ganancia de tensión* del montaje particular que se considere.

Dado que los valores eficaces de las variaciones de placa y de reja están ligados entre sí por la ecuación (31), podemos derivar de ésta una fórmula general para calcular la ganancia. Se obtiene, en efecto, fácilmente, y llamando A a la amplificación:

$$A = \frac{E_p}{E_g} = \frac{\mu R_b}{r_p + R_b} \qquad (33)$$

Ejemplo. En el caso considerado en el ejemplo anterior, se tiene

$$A = \frac{100 \times 130000}{70000 + 130000} = \frac{13000000}{200000} = 65$$

Conocida la ganancia de un montaje, se puede calcular fácilmente el valor eficaz (o la amplitud) de la variación de placa cuando se conoce la de reja. En efecto, introduciendo A en la ecuación (31) se tiene

$$E_p = A \cdot E_g \qquad (34)$$

Así, para $E_g = 1{,}2$ volts, volvemos a obtener $E_p = 65 \times 1{,}2 = 78$ volts.

Algunos autores rigoristas suelen arrastrar el signo (—) de la ecuación (28) hasta la fórmula de la ganancia (33). Pero es un falso rigor si no se introduce una notación especial para representar las magnitudes alternas, ya que, como la hemos definido aquí, la ganancia es la relación entre dos valores eficaces de tensión, y esos valores son *esencialmente* positivos en todos los casos. Debemos tener en cuenta, sin embargo, que hay una diferencia de fase de 180° entre los valores instantáneos de e_g y e_p.

6.10 — Circuito de placa equivalente. Vamos a introducir ahora una representación simplificada del triodo, que resulta muy útil para el estudio de los amplificadores de tensión. Para ello basta una simple observación: *La corriente I_p que dan las ecuaciones* (26a) y (27) *es la misma que circula en el circuito de la Fig. 51.* En éste tenemos un generador de fuerza electromotriz igual al μE_g volts eficaces y de resistencia interna igual a r_p sobre cuyos terminales K y P se ha conectado la resistencia de carga R_b. Según la ley de Ohm, el valor eficaz de la corriente de este circuito es

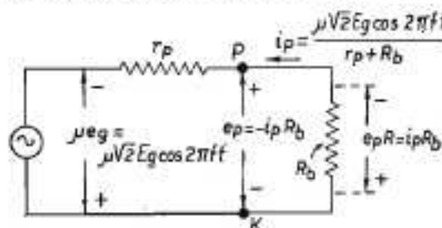


Fig. 51 — En este circuito circula por R_b la misma componente alterna de corriente que en el de la Fig. 30.

$$I_p = \frac{\mu E_g}{r_p + R_b} \qquad (35)$$

puesto que puede considerarse que la fuerza electromotriz o tensión eficaz μE_g está aplicada a la combinación *en serie* de los resistores r_p y R_b, cuya resistencia total es $r_p + R_b$.

El resistor R_b no puede, evidentemente, "darse cuenta" si las variaciones I_p de la corriente que por él pasa son causadas por el triodo de la Fig. 50 o por el generador de la Fig. 51. Excepto porque en el caso del triodo, I_p representa variaciones de la corriente continua y en el caso del generador, simplemente, una corriente alterna, los efectos variacionales, que son los que interesan *en este caso*, son exactamente los mismos.

Por lo tanto, por lo que respecta a las variaciones de corriente en la carga, un triodo de factor de amplificación μ y resistencia de placa r_p, a cuya reja se aplique una tensión alterna de valor eficaz E_g, no puede distinguirse de un generador de fuerza electromotriz μE_g y resistencia interna r_p.

¿Qué sucede con las variaciones de tensión? En el circuito de la figura 51, la corriente produce en la resistencia R una *caída de tensión*

$$e_{pR} = i_p R_b$$

o sea, puesto que

$$i_p = \sqrt{2}\, I_p \cos 2\pi ft$$

$$e_{pR} = \sqrt{2}\, I_p R_b \cos 2\pi ft$$

$$= \frac{\mu R_b \sqrt{2}\, E_g}{r_p + R_b} \cos 2\pi ft$$

Esta caída de tensión difiere de las variaciones de tensión Δe_b (es decir, de e_p) del circuito del triodo, solamente en el signo (compárese con la ecuación (28).

Podemos escribir entonces

$$e_p = \Delta e_b = -e_{pR}$$

$$e_p = -\frac{\mu R_b}{r_p + R_b} \sqrt{2}\, E_g \cos 2\pi ft$$

y, ya que conocemos el significado del signo (—),

$$e_p = \frac{\mu R_b}{r_p + R_b} \sqrt{2}\, E_g \cos (2\pi ft - \pi)$$

es decir, volvemos a la ecuación (30). En el circuito de la Fig. 51, la componente alterna de la tensión de placa aparece como la diferencia de tensión alterna entre el punto P y el punto K. Tiene el mismo valor que la caída de tensión en la resistencia R_b, pero de signo opuesto.

Lo que antecede puede aparecer algo confuso a causa de la dificultad que se presenta al interpretar el significado de los signos + y —. Merece la pena tratar de aclararlo un poco. En todas las ilustraciones de este texto donde figuran tensiones y corrientes, hemos puesto para las primeras los signos + y —, y para las segundas, flechitas.

"Tensión" equivale a "diferencia de potencial". Diferencia de potencial equivale, a su vez, al potencial eléctrico de un punto con respecto a otro. Decir que el potencial de la reja es de e_c volts con respecto al cátodo, significa que la reja está a un potencial de e_c volts *sobre* cátodo. Que nos referimos al potencial de la reja con respecto al cátodo y no al del cátodo con respecto a la reja, lo indicamos poniendo en la figura el signo (+) *del* lado de la reja, y el signo (—) del lado del cátodo. $e_c = 5$ volts indica que la reja es cinco volts positiva con respecto al cátodo. $e_c = -5$ volts significa, por el contrario, que la reja es negativa con respecto al cátodo. En lugar de "diferencia de potencial" o de "potencial con respecto a" usamos muchas veces las palabras "tensión" y "voltaje". Debe decirse tensión (o voltaje) entre el punto A y el punto B, *en este orden*, para dar a entender que cuando esa tensión está expresada por un número positivo, el punto A es positivo con respecto al B.

En el caso de las corrientes, el sentido positivo de circulación se indica con una flechita. $i_b = 5$ mA significa que en la Fig. 50 la corriente circula en el sentido de la flecha y haría marcar 5 mA a un miliamperímetro intercalado en el circuito. $i_b = -5$ mA indicaría una corriente de igual magnitud, pero que circula en sentido opuesto.

Cuando una corriente pasa por una resistencia, el extremo por donde entra la corriente es positivo con *respecto al extremo* de salida. La tensión que aparece entre el extremo de entrada y el de salida se llama *caída de potencial*. Las caídas de potencial se calculan con la ley de Ohm

$$E = RI$$

Como R es siempre positiva, E tiene el mismo signo, matemáticamente, que I. Por lo tanto, al poner los signos + y — en la indicación de las caídas de potencial hay *que poner siempre* el signo + del lado por donde entra la corriente para que la ley de Ohm tenga un significado cabal. Por eso en la Fig. 50 puede escribirse $e_R = R_b \cdot i_b$. Pero si quisiéramos expresar el potencial del extremo superior de la resistencia R_b con respecto al inferior, debemos decir que ese potencial es igual a $-e_R$, si e_R representa la caída de tensión en la resistencia. No hay contradicción: un pozo tiene 30 metros de profundidad o —30 metros de altura; el sentido positivo de la profundidad es hacia *abajo, el* de la altura, hacia arriba; los números que las expresan, refiriéndose a la misma cosa, deben tener diferente signo.

Las corrientes salen, *por lo común* (no siempre es así: ¡piénsese en los acumuladores en carga!), del polo positivo de las baterías. Por eso conviene que las flechitas que indican el sentido positivo de las corrientes salgan del polo positivo de las baterías o de los generadores. De este modo, como la corriente que produce *una batería* sale de su polo positivo y se calcula con esta otra forma de la ley de Ohm

$$I = \frac{E}{R}$$

se conserva el valor matemático pleno de esta ecuación.

El problema se complica aún más en el caso de los circuitos de corriente alternada, *porque aquí las* corrientes y las tensiones cambian periódicamente de sentido. Pero observemos que una corriente alterna se expresa por una ecuación del tipo

$$i_p = \sqrt{2}\, I_p \cos 2\pi ft$$

y ésta, para diferentes valores de t, arroja valores positivos o negativos, según el signo que resulte para $\sqrt{2}\, I_p \cos 2\pi ft$. ¿Qué indica *entonces* la flechita i_p *en la Fig. 51*? Indica, simplemente, el sentido en que circula la corriente cuando I_p es positivo en la *ecuación anterior.*

Del mismo modo, los signos + y — puestos en la indicación e_g en la Fig. 51 expresan que el terminal superior del generador es positivo con respecto al inferior cuando la ecuación que expresa el valor de e_g arroja valores positivos. Cuando en un circuito hay un generador de corriente alterna, hay que respetar la misma *convención con respecto* a los *sentidos elegidos* como positivos para la tensión y la corriente que

en el caso de corriente continua, para que así la ley de Ohm **aplicada** a las corrientes alternadas conserve su significación matemática.

Tratemos de justificar ahora la elección de sentidos positivos que se ha hecho en la Fig. 51. Para ello volvamos a la Fig. 50 y recordemos que i_p no es otra cosa que Δi_b. Cuando *Δi_b es positivo*, sabemos que la *corriente* aumenta; al valor primitivo se agrega Δi_b en el mismo sentido. Por lo tanto Δi_b *sale* del extremo superior de R_b y por eso el sentido positivo de i_p en la Fig. 51 es el que sale también del extremo superior de R_b.

Ahora recordemos que

$$i_p = \sqrt{2}\,\frac{\mu E_g}{r_p + R_b} \cos 2\pi ft$$

que puede escribirse también ($\sqrt{2}\, E_g \cos 2\pi ft = e_g$)

$$i_p = \frac{\mu e_g}{r_p + R_b}$$

En esta ecuación i_p es positivo cuando lo es e_g, porque tanto μ como r_p y R_b son siempre positivos. Por lo *tanto, el sentido* positivo de μe_g no *puede* ser sino el que se eligió en la figura.

Por otra parte, e_p no es otra cosa que Δe_b. A su vez, e_b es el potencial de la placa con respecto al cátodo. Δe_b positivo significa que e_b aumenta

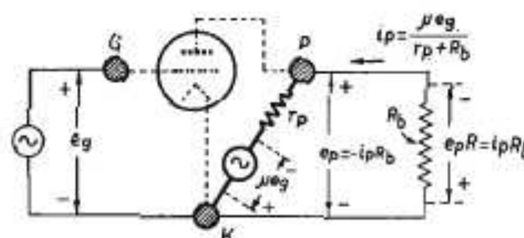


Fig. 52 – Circuito equivalente del triodo cuando se desprecian las capacitancias interelectródicas. El triodo se representa con líneas de puntos para mostrar la correspondencia que existe entre los puntos G, P y K del circuito equivalente a los electrodos del tubo

Por lo tanto, en la Fig. 51 el *sentido positivo* de e_p no puede ser sino el elegido. Este es opuesto al de la caída de tensión e_{pR} en la resistencia R_b, el cual debe conformarse necesariamente al que antes se eligió para i_p.

El significado cabal del circuito equivalente del triodo se interpreta en la Fig. 52. El triodo que se muestra con líneas de puntos para recordar su posición original en el circuito, se reemplaza por los tres puntos G, P y K, que representan, respectivamente, los terminales de reja, de placa y de cátodo, y el *generador μe_g conectado* en serie con la *resistencia r_p* entre los terminales K y P. La carga R_b se conecta en la forma habitual, es decir, entre placa y cátodo, y el generador variacional e_g también en la forma habitual, esto es, entre cátodo y reja. Hecho esencial en el circuito original es que a e_g positiva, es decir, a un aumento en la tensión de *reja a cátodo*, corresponde una *disminución* de la tensión de *placa a cátodo* e_b, esto es, un Δe_b negativo, o lo que es igual, un valor de e_p *negativo*. Este aspecto *se satisface plenamente* en la *representación* de la *Fig.* 52 gracias a la adecuada asignación de los sentidos positivos.

Nótese que, limitada la validez del teorema básico al caso de reja

negativa, no hay en la Fig. 50 corriente de reja. En la Fig. 52, el generador de tensión e_g está en circuito abierto y, conforme a lo que puede esperarse, no entrega corriente. Sin embargo, veremos poco más adelante que esta idea corresponde a una sobresimplificación del problema que, si bien es aceptable en muchos casos, conduce en otros a pasar por alto aspectos de *fundamental importancia* en el funcionamiento de los triodos y de los tubos electrónicos en general.

6.11 — Otra limitación del circuito equivalente. Distorsión. Volvamos por un momento a la Fig. 48. Y observemos que si en lugar de aplicar una variación positiva $+\Delta e_c$ a la reja, le aplicáramos una negativa de igual magnitud $-\Delta e_c$, pasaríamos al punto F, al que corresponde una tensión de placa e_{bF} mayor que Eb_o. Hay entonces una variación positiva de esta tensión, que llamaremos $\Delta' e_b$ y que es igual a $e_{bF} - E_{bo}$. El valor de esta variación podría calcularse con la ecuación (21) escribiendo en ella $-\Delta e_c$ en lugar de Δe_c. Y puesto que sólo se cambia el signo, la aplicación de la fórmula conduce a

$$\Delta' e_b = -\Delta e_b$$

Es fácil darse cuenta, observando la Fig. 48, que tal cosa será reflejo fiel de la realidad cuando el segmento QF de la línea de carga sea igual al QB, es decir, cuando las distancias entre las curvas de la familia, *medidas sobre la recta de carga sean iguales*. En la Fig. 47 se observa que esta condición no se cumple de un modo exacto, y, como ya lo habíamos hecho notar, los resultados de la fórmula que nos ocupa son sólo aproximados. Dijimos también que al tratar de calcular el valor de las variaciones de i_b y de e_b que corresponden a una determinada variación de e_c no es necesario preocuparse de los errores que pudieran cometerse para la mayoría de las aplicaciones prácticas, siempre que no excedan los límites bastante amplios mencionados en su oportunidad.

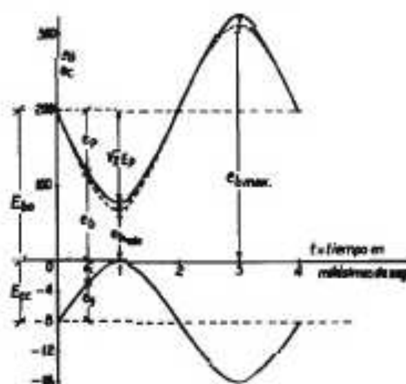


Fig. 53 — Variación teórica (curva superior llena) de la tensión de placa del triodo cuando se aplica a una variación senoidal a la reja (curva inferior). La curva de puntos representa los valores obtenidos por el método gráfico (Fig. 54), más cercanos a la realidad. Las variaciones de e_b no son ya senoidales y se dice que hay distorsión.

Pero hay otro aspecto de la cuestión en el cual esta falta de exactitud de las fórmulas es, desgraciadamente, de gran importancia. Y es la que se refiere a la *fidelidad* con que las variaciones de e_b siguen a las de e_c, o, si se quiere, a la fidelidad con que los valores de e_p siguen a los de e_g (recuérdese que e_p y e_g son las variaciones de e_b y de e_c). Si la fórmula en cuestión y, por lo tanto todas las que de ellas hemos obtenido, fueran exactas, las cosas ocurrirían como se representa con línea llena en la Fig. 53. Es fácil darse cuenta cómo ha sido hecha esta figura a pesar de lo complicada que parece. Se han dibujado dos rectas o ejes (Ot) y (Oe_b, e_c). Sobre la primera hay una escala de tiempo en milésimas de segundo; en el eje vertical hacia arriba, una escala para las tensiones e_b, y hacia abajo, para las tensiones e_c. Se ha supuesto entonces que se aplica una tensión $-E_{cc} = -8$ como tensión fija de reja (polarización), más una tensión variable,

$$e_g = 8 \text{ sen } 2\pi \times 250 \times t$$

es decir, una tensión alternada de amplitud $\sqrt{2}\, E_g = 8$ y frecuencia $f = 250$ c/s. Esta onda de tensión se ha dibujado punto por punto sobre la recta horizontal trazada por el punto correspondiente a -8 volts del eje vertical. Por ejemplo, para $t = 0{,}0005$ segundo (½ milisegundo) se tiene

$$e_g = 8 \text{ sen } \pi \times 2 \times 250 \times 0{,}0005 = 8 \text{ sen } \pi \times 0{,}25$$
$$= 8 \text{ sen } \pi/4 = 8 \text{ sen } 45^\circ = 8 \times 0{,}707 = 5{,}656 \text{ volts}$$

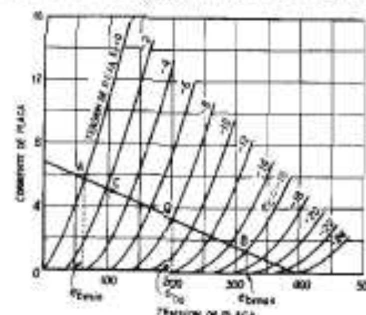


Fig. 54 — Análisis gráfico de la distorsión en el triodo. Se ha trazado la línea de carga con $E_{bb} = 400$ V y $R_b = 60\,000$ ohms. La tensión de placa de reposo es $E_{bo} = 200$ volts. Los valores extremos e_{bmin} y e_{bmax} se obtienen en los puntos A y B para, respectivamente, $e_c = 0$ volts ($e_g = +8$ volts) y $e_c = -16$ volts ($e_g = -8$ volts). El punto C corresponde al punto tomado como ejemplo para el cálculo teórico en el texto y en la Fig. 36.

y e_c, que como sabemos es

$$e_c = -E_{cc} + e_g$$

resulta

$$e_c = -8 + 5{,}656 = 2{,}344 \text{ volts} \qquad (t = 0{,}0005 \text{ seg.})$$

Estos valores se han representado como ejemplo en la *figura*, marcándolos con flechas. En el punto elegido como de partida en las características de la válvula (Fig. 54) se tiene aproximadamente $\mu = 19$ y $r_p = 12\,000$ ohms. *Además*, se ha tomado $R_b = 60\,000$ ohms. Con la fórmula

$$\Delta e_b = -\frac{\mu R_b}{r_p + R_b} \sqrt{2}\, E_g \cos 2\pi f t$$

calculamos para el valor de t del ejemplo

$$\Delta e_b = e_p = -\frac{19 \times 60\,000}{12\,000 + 60\,000} \times 5{,}656 \cong -89{,}5 \text{ volts}$$

Este valor se descuenta de E_{bb}, como se muestra en la figura, para obtener e_b. Repitiendo lo mismo para otros instantes, resulta, como es de esperar, que los valores de e_p están sobre una senoide alrededor de la horizontal trazada por el punto del eje vertical que corresponde a

$e_b = E_{bb} = 200$ volts. En realidad basta, sabiendo que e_p debe ser una variación senoidal, con calcular la *amplitud* de esta senoide $\sqrt{2}E_p$ con la ecuación (31), recordando que $\sqrt{2}E_g = 8$ volts. Se tiene así

$$\text{Amplitud de } e_p = \sqrt{2}E_p = \frac{\mu R_b}{r_p + R_b}\sqrt{2}\,E_g =$$

$$= \frac{19 \times 60\,000}{12\,000 + 6000} \times 8 \cong 125 \text{ volts}$$

Para esta amplitud de variaciones, e_b resulta variar entre un valor mínimo

$$e_{bmin} = 200 - 125 = 75 \text{ volts}$$

y un valor máximo (ver la figura)

$$e_{bmax} = 200 + 125 = 325 \text{ volts}$$

En la Fig. 54 se estudia gráficamente el mismo caso trazando la línea de carga en la forma conocida. Se observa que el valor real de e_{bmin} es de unos 62 volts, mientras que el valor de e_{bmax} es de unos 312 volts.

La variación negativa máxima de e_b es de

$$62 - 200 = -138 \text{ volts}$$

y la positiva máxima, de

$$312 - 200 = 112 \text{ volts}$$

en lugar de los 125 volts que arroja el cálculo numérico para los dos casos. Se comete un error al aplicar las fórmulas. Este error es de poca importancia si sólo se atiende a las magnitudes, sobre todo teniendo en cuenta que la suma de las magnitudes de las dos variaciones es igual a 138 + 112 = 250 volts, exactamente igual a 2 × 125 volts. *Lo importante es que la variación de e_b ya no es senoidal.* La línea de trazos superpuesta a la llena, en la Fig. 53, que ha sido trazada con valores leídos en el gráfico de la Fig. 54, muestra, en efecto, que el pico dirigido hacia abajo se *alarga* con respecto a la senoide pura, mientras que el pico dirigido hacia arriba se *achata*. No es ya una senoide perfecta, pero cualquiera diría que es una senoide *deformada*. Como tenemos cierta tendencia a emplear términos raros, en vez de *deformada* decimos *distorsionada*, y en vez de *deformación*, *distorsión* (¡consúltese el diccionario!). Descubrimos así que, en rigor, las variaciones de la tensión de placa no siguen tan fielmente como creíamos a las de la tensión de reja, sino que entre ambas hay cierta discrepancia que llamamos distorsión. Y, sobre todo, comprendemos que el teorema del circuito equivalente no toma en cuenta esta distorsión.

¿Es importante la distorsión? ¿Puede expresarse con un número? Sí y sí. Pero no es éste el lugar para ocuparnos más extensamente de ella. Contentémonos con decir que en el caso considerado *la distorsión es de más o menos el 10 %*, cifra que los entendidos estiman intolerable en un buen "combinado".

Si repitiéramos el análisis para valores máximos de e_g mucho más pequeños (1 ó 2 volts), veríamos que la distorsión sería mucho menos notable, tal vez, en cifras, 0,5 %, algo realmente ***insignificante***.

¿Qué conclusiones? El teorema del circuito equivalente es muy útil cuando no interesa tomar en cuenta la distorsión, sea porque no paramos mientes en la "fidelidad", sea porque, presumiblemente, es insignificante. Cuando es necesario en nuestros estudios tomar en cuenta la insidiosa distorsión, no queda otro remedio que el de recurrir al método gráfico y —téngalo bien presente— a la experimentación directa de los circuitos que se proyectan o estudian. Una de las habilidades del técnico eficiente es la de aplicar en cada caso el método más adecuado, es decir, el que permite llegar a *resultados válidos* en el menor tiempo posible. Conocer los pequeños grandes secretos de la técnica reporta una economía de tiempo y de trabajo, y el que "rinde por dos" es, muchas veces, sólo el hombre que sabe lo que tiene entre manos.

6.12 — Capacitancias interelectródicas. A medida que "buceamos" el interior del triodo vamos encontrando cosas que llaman la atención, lo que, desdichadamente, complica nuestra existencia. Esta representación tan elegante de la Fig. 52, tiene, por ejemplo, sus defectos. Sinceramente no nos "convence" esto de dejar los terminales del generador de reja en el aire, tal vez porque es cosa demasiado hermosa para ser cierta. ¿Es posible que tal generador desempeñe tan cómodamente su función controladora y que "todo el fardo" se cargue a la pobrecita placa? La experiencia enseña que no, y, más aún, con métodos de medición bastante sensibles se muestra que hay cierta corriente de reja, aunque ésta nunca llegue a ser positiva. Pero si no llega a ser positiva la reja, buenamente no capta electrones; luego, si esa corriente existe, otras deben ser sus causas. Reflexionemos un poco. La reja está formada por un alambrecito arrollado alrededor del cátodo, bastante próximo a él. Un condensador (digamos capacitor para ser más exactos) es el sistema formado por dos cuerpos conductores puestos en proximidad uno del otro y separados por un medio aislante. La reja y el cátodo forman, pues, un pequeño capacitor: la reja es una armadura, el cátodo es la otra, el "medio aislante" es el *vacío*. Entre las dos armaduras están aplicados los terminales del generador e_g. Este capacitor constituye una *carga* para el generador, a través de la cual éste forzará cierta corriente. ¿Cuánta? Si llamamos C_{gk} a la capacitancia del capacitor en cuestión, E_g al valor eficaz de e_g, f a la frecuencia, e I_{gk} al valor eficaz de la *corriente* i_{gk} que nos preocupa, y (¡de capital importancia!) si recordamos un poco a las corrientes alternas, decimos sin vacilar que es

$$i_{gk} = \frac{\sqrt{2}\,E_g}{\dfrac{1}{2\pi f C_{gk}}}\cos(2\pi f t + \pi/2) = 2\sqrt{2}\pi f\,C_{gk}\,E_g\cos(2\pi f t + \pi/2) \tag{36}$$

puesto que $$e_g = \sqrt{2}\,E_g\cos\,2\pi f t$$

y la corriente en un capacitor está *adelantada* un cuarto de período (un ángulo de 90° = $\pi/2$) con respecto a la *tensión*. El valor eficaz de i_g resulta ser

$$I_{gk} = 2\pi f C_{gk} E_g \tag{37}$$

¿Cuánto vale C_{gk}? Depende, desde luego, de la construcción del tubo

y, sobre todo, de su tamaño. Los conductores que conectan la reja y el cátodo con las patitas del tubo añaden también su cuota nada despreciable. Los manuales dan la capacitancia C_{gk} para cada caso particular, pero en los tubos para receptores y amplificadores chicos encontrará siempre valores comprendidos entre 3 y 10 micromicrofarads ($\mu\mu F$). La reactancia $\frac{1}{2}\ \pi f C_{gk}$ de un capacitor de 10 $\mu\mu F$ es de 1,6 megohms a la frecuencia de 10 000 ciclos por segundo; con una frecuencia de 1 000 000 de ciclos por segundo (1 megaciclo) baja a 16 000 ohms, y para 100 megaciclos, ¡a sólo 160 ohms!

¿Le parecen despreciables estas últimas cifras consideradas como impedancia de la carga de un generador?

Pero no es C_{gk} el único convidado de piedra con quien tenemos que habérnosla. En efecto, la reja forma un capacitor también con la placa, y ésta otro más con el cátodo. Los llamaremos, respectivamente, C_{gp} y C_{pk}. Son más o menos del mismo valor de capacitancia que C_{gk}[1].

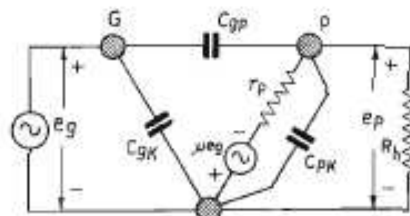


Fig. 55 – Al circuito equivalente de la Fig. 32 se agregan ahora las capacitancias interelectródicas.

Comprendemos que nuestro circuito equivalente necesita un apuntalamiento si queremos conservarlo en los casos en que, por lo elevado de la frecuencia, haya que tomar en cuenta estas capacitancias para no cometer errores muy serios con respecto a las condiciones en que se encuentra el generador de reja. Por lo menos necesitamos investigar un poco la cuestión para darnos cuenta del punto a partir del cual estos infaltables visitantes merecen ser considerados.

¿Y entonces qué? ¿Por dónde encaramos el problema? Lo más fácil será agregar estos capacitores en el circuito de la Fig. 52 y detenernos a considerar lo que ocurre. Vea la Fig. 55; hemos suprimido el dibujo del tubo por innecesario, pero agregamos C_{gk}, C_{gp} y C_{pk}. Veamos. Mirando la figura resulta que C_{pk} viene a estar en paralelo con R_b. ¿Por qué no considerar que la carga del tubo está formada en realidad por R_b y C_{pk} en paralelo? Nos liberamos así de C_{pk}; lo malo es que nuestra carga no es ahora una resistencia pura como veníamos suponiendo, y esto complica un poco, no mucho, este aspecto del problema. Dejaremos para otra oportunidad ver cómo se soluciona esta complicación; conformémonos con aceptar que la complicación no es muy importante y despidámonos por ahora de C_{pk}.

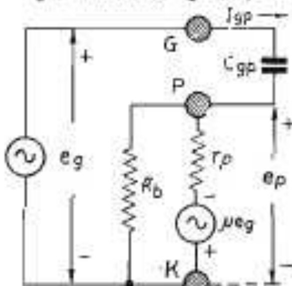


Fig. 56 – Dibujando en esta forma el circuito de la Fig. 32, se ve con claridad que la tensión aplicada al capacitor C_{gp} es $e_g - e_p$.

Con respecto a C_{gk}, tampoco hay mucho que preocuparse: está directamente cargado al generador de reja y toma de él la corriente I_{gk}, que sabemos calcular.

1 Como se ha dicho más arriba, estas capacitancias comprenden las de entre electrodos propiamente dichos y las de las conexiones que van de aquéllos a las patitas del tubo.

El hueso más difícil de roer es C_{gp}. Pero hay un secreto para resolver problemas de circuitos: es el de dibujarlos en forma sencilla, tratando de poner en evidencia los aspectos que se busca contemplar. Ya lo verá. Descartados C_{pk} y C_{gk} volvamos a dibujar el circuito como lo muestra la Fig. 56. Convénzase de que es lo *mismo*. ¿Qué tensión hay aplicada entre las armaduras de C_{gp}? O de otro modo, ¿cuál es el potencial del punto G con respecto al punto P? Si G está e_g volts sobre K, y P a e_p volts sobre K, G está sobre P a un potencial que llamaremos e_{gp}.

$$e_{gp} = e_g - e_p$$

¿Qué corriente i_{gp} circula por C_{gp}? Evidentemente, poniendo

$$e_g = \sqrt{2}E_g \cos 2\pi ft$$

y recordando que

$$e_p = \frac{\mu R_b}{r_p + R_b}\, e_g = -\frac{\mu R_b}{r_p + R_b} \sqrt{2}E_g \cos 2\pi ft$$
$$= -A\sqrt{2}\,E_g \cos 2\pi ft$$

se tiene

$$e_{gp} = e_g - e_p = \sqrt{2}\,E_g \cos 2\pi ft - (-A\sqrt{2}\,E_g \cos 2\pi ft)$$

que es lo mismo que escribir

$$e_{gp} = (1 + A)\sqrt{2}\,E_g \cos 2\pi ft$$

Por lo tanto

$$i_{gp} = \frac{(1 + A)\sqrt{2}\,E_g \cos(2\pi ft + \pi/2)}{\dfrac{1}{2\pi f\, C_{gp}}}$$
$$= 2\pi f\, C_{gp}\,(1 + A)\sqrt{2}\,E_g \cos(2\pi f t + \pi/2) \qquad (38)$$

donde a $2\pi ft$ ha sido agregado $\pi/2$ para tener en cuenta que la corriente capacitiva está adelantada en $\pi/2$ con respecto a la tensión. El valor eficaz de i_{gp} es entonces

$$I_{gp} = 2\pi f\, C_{gp}\,(1 + A)\,E_g \qquad (39)$$

Esta corriente, como se ve en la figura, *sale* del generador e_g. Si a éste le preguntaran ¿cómo lo "cargan", amigo generador?, diría: —Mi tensión entre terminales es de E_g volts eficaces y del de arriba sale una corriente de I_{gp} amperes; mi carga debe ser

$$\text{carga de } e_g = \frac{E_g}{I_{gp}}$$

Agregaría tal vez que se "da cuenta" de que *la carga es capacitiva*, porque la corriente está adelantada 90° con respecto a la tensión.

¡Ah! Entonces, según acabamos de calcular,

$$\text{carga de } e_g = \frac{E_g}{I_{gp}} = \frac{1}{2\pi f\, C_{gp}\,(1 + A)} \qquad (40)$$

Esto es, *la reactancia de un capacitor cuya capacitancia es igual a* $(1 + A)$ *veces* C_{gp}.

Es decir, debido a C_{gp}, el generador encuentra el tubo *equivalente* a un capacitor de capacitancia

$$C_{eq} = (1 + A)\ C_{gp} \qquad (41)$$

Como, además, tiene directamente conectado a C_{gk} entre sus terminales, la capacitancia total que "siente" es

$$C_{ig} = C_{gk} + (1 + A)\ C_{gp} \qquad (42)$$

Anote esta fórmula en su libreta. *Es capital.*

¿Un ejemplo?: Un triodo 6F5 tiene $C_{gp} = 2.4\ \mu\mu F$ y $C_{gk} = 5.5\ \mu\mu F$. Funciona con una carga resistiva pura, de modo que la ganancia es de 60. El generador que provee las variaciones de reja encuentra una capacitancia, según la ecuación (41),

$$C_{eq} = 5.5 + (1 + 60)\ 2.4 = 151.9\ \mu\mu F$$

Y esta capacitancia, a 10 000 ciclos por segundo anda por los 100 000 ohms de reactancia: a 1 megaciclo, por los 1000 y a 100 megaciclos ¡por los 10 ohms!

Este ejemplo es aplastante. Pero habrá notado que hemos salido del paso en el Capítulo VII del texto inventando el tetrodo.

Ahora queremos hacer notar algunas cosas. Primero, que nuestra linda demostración tiene un defecto y es que, habiendo agregado C_{pk} a la carga R_b, hemos calculado la ganancia con R_b sola. Hemos ganado en simplicidad, pero cerramos los ojos a cosas muy interesantes. Cuando la carga no es resistiva para sino que tiene una parte reactiva, el generador e_g encuentra no sólo capacitancia en la válvula sino que *en paralelo con ella aparece también una resistencia.* Y, cosa curiosa, esa resistencia es *positiva* cuando la carga es capacitiva, y es *negativa* cuando la carga es inductiva. ¿Qué es una resistencia negativa? ¡Ah, la convención de signos! La ley de Ohm dice que si un acumulador de E volts alimenta a un resistor de R ohms, *entrega* una corriente

$$I = \frac{R}{E}\ \text{amperes}$$

Y el acumulador dice: —Si tengo E volts y entrego I amperes, que salen de mi terminal +, mi resistencia de carga[1] es una resistencia

$$R = \frac{E}{I}\ \text{ohms}$$

Pero pongamos el acumulador en conexión con un cargador de baterías. Entonces la corriente entra por el polo positivo +, y como estamos tomando como positivas las corrientes que salen del polo +, esa corriente es negativa. Y el acumulador reflexiona: —Tengo E volts, entran por mi polo positivo I amperes, es decir, entrego $-I$ amperes. Luego, mi resistencia de carga es

[1] Debe tenerse cuidado de interpretar el término "carga" debidamente a causa de que se lo emplea indistintamente para designar la impedancia conectada a los terminales de un generador y alimentada por éste, y para referirse a la cantidad de electricidad contenida en un acumulador, una batería o un capacitor.

$$R = \frac{E}{-I} = -\frac{E}{I}\ \text{ohms}$$

¡Una resistencia negativa!

Decir entonces que la válvula presenta resistencia negativa al generador no es más que una manera elegantemente oscura de decir que aparece una corriente que va de la válvula al generador. Más todavía. Nuestro acumulador que entrega la corriente I positiva a una resistencia R positiva, entrega una potencia

$$W = R\ I^2$$

¿Y cuando está conectado al cargador? Bueno, entonces R es un número negativo, I también, pero como está elevado al cuadrado da lo mismo que sea positivo o que sea negativo. Entonces W es un número negativo. Claro. El acumulador recibe potencia del cargador, es decir, entrega potencia negativa. Esta cuestión de los signos nos está enseñando a hablar al revés, pero no importa.

En nuestra válvula, el generador e_g recibe potencia de la válvula cuando ésta le presenta una resistencia negativa. Eso es todo. Mejor dicho, casi todo, porque ¿de dónde sale esa potencia? No es difícil de contestar esta pregunta: de la única parte donde puede salir: de la batería de placa.

Hay todavía otras cuestiones de importancia. El tiempo de tránsito de los electrones, por su mecanismo de lo más enrevesado, también pone una resistencia entre reja y cátodo; y la inductancia de la conexión del cátodo aporta también su granito de arena. Nos iríamos muy lejos si nos pusiéramos a investigar estas cosas. Estas nuevas resistencias son bastante pequeñas cuando la frecuencia es de 20 ó 30 megaciclos o más; tal vez sólo unos cuantos miles de ohms. Son siempre positivas. ¿En conclusión? *El triodo presenta al generador de reja una impedancia formada por una reactancia capacitiva en paralelo con una resistencia positiva o negativa, según el carácter de la carga. La componente reactiva tiene efectos importantes, aun para frecuencias relativamente bajas (10 000 ciclos por segundo, o menos). La componente resistiva es importante sólo cuando se trata de frecuencias bastante elevadas.*

7.4 — Ganancia de los pentodos. El elevado factor de amplificación de los pentodos permitiría, al parecer, lograr ganancias mucho mayores que en los triodos. No es tanto así, sin embargo a causa de que el factor de amplificación elevado va acompañado de una altísima resistencia de placa. En los triodos, con resistencias de placa que van de centenares o unos pocos miles de ohms hasta unos 70 000 como máximo, según el tipo, los valores prácticos de la resistencia de carga, de 20 a 250 000 ohms, resultan varias veces mayores que la resistencia de placa. Observando la fórmula (33) y escribiéndola así

$$A = \frac{\mu}{1 + \dfrac{r}{R_b}}$$

se observa que A difiere poco de μ cuando R_b es mucho mayor que r_p. En los pentodos, en cambio, pretender hacer R_b mucho mayor que r_p lleva a valores no prácticos de R_b. En realidad, no es posible en la práctica emplear resistencias de carga mayores de 500 000 ohms o de 1 megohm, y se usan preferentemente valores aun menores. Por consiguiente, los valores prácticos de la ganancia resultan varias veces menores que μ.

7.5 — Circuito equivalente de placa para el pentodo. El valor de μ como representativo del mérito del tubo como amplificador pierde importancia por la razón explicada en el párrafo anterior. Conviene, por eso, dar otra forma a la expresión de la ganancia. Mejor, sin embargo, es empezar por la fórmula del teorema del circuito equivalente.

$$I_p = \frac{\mu E_g}{r_p + R_b}$$

Esta expresión se modifica convenientemente con las siguientes manipulaciones, fáciles de seguir:

Multiplicando y dividiendo el numerador por r_p,

$$I_p = \frac{\frac{\mu}{r_p} r_p E_g}{r_p + R_b}$$

y como

$$\frac{\mu}{r_p} = g_m$$

$$I_p = g_m E_g \frac{r_p}{r_p + R_b} \qquad (43)$$

y multiplicando y dividiendo por R_b

$$I_p = \left(g_m E_g \frac{r_p R_b}{r_p + R_b} \right) \div R_b \qquad (44)$$

Obsérvese ahora que $g_m E_g$, producto de una conductancia (ampere sobre volt) por una tensión (volt) es una corriente (ampere); que esa corriente multiplicada por $r_p R_b \div (r_p + R_b)$, es decir, la resistencia resultante de la combinación en paralelo de r_p y R_b da una caída de tensión. Y finalmente esa caída de tensión dividida por R_b da la parte de la corriente $g_m E_g$ que circula por R_b, la cual es, precisamente, la I_p que buscamos.

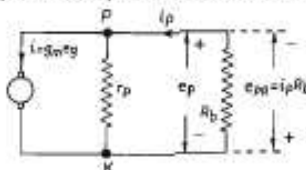


Fig. 57 — Forma elemental del circuito equivalente adecuado para el caso del pentodo. El tubo se asimila a un generador de corriente constante $g_m \cdot e_g$ en paralelo con la resistencia r_p. Compárese con la Fig. 51.

Las fórmulas (43) y (44) convienen también al circuito equivalente de la figura 57, como es fácil verificar aplicándole el razonamiento anterior. Aquí el tubo se reemplaza por un *generador de corriente electromotriz constante* (es decir, independiente de la carga) e igual a $g_m e_g$ *en paralelo* con la resistencia de placa r_p. Los puntos P y K representan, como siempre, la placa y el cátodo.

Se tiene así una nueva forma del circuito equivalente, aplicable también a los triodos.

El valor eficaz de la tensión alternada de placa, E_p, se calcula fácilmente:

$$E_p = I_p R_b$$

Introduciendo el valor I_p que da la ecuación (43):

$$E_p = g_m E_g \frac{r_p}{r_p + R_b} \cdot R_b$$

Reordenando los términos del segundo miembro, se tiene:

$$E_p = g_m \frac{r_p R_b}{r_p + R_b} E_g$$

y la ganancia, relación entre los valores eficaces de E_p y E_g,

$$A = \frac{E_p}{E_g} = g_m \frac{r_p R_b}{r_p + R_b} \qquad (45)$$

En la práctica, como dijimos, R_b es varias veces menor que r_p. Se puede admitir a menudo que la parte de la corriente $g_m E_g$ que circula por r_p es muy pequeña comparada con la que pasa por R_b, puesto que ésta ofrece en tales casos mucho menor resistencia que r_p. Por lo tanto, se puede tomar, tolerando cierto error

$$I_p = g_m E_g \qquad (46)$$

$$E_p = g_m E_g R_b \qquad (47)$$

$$A = g_m R_b \qquad (48)$$

Se ve, entonces, que lo importante en el pentodo es la transconductancia.

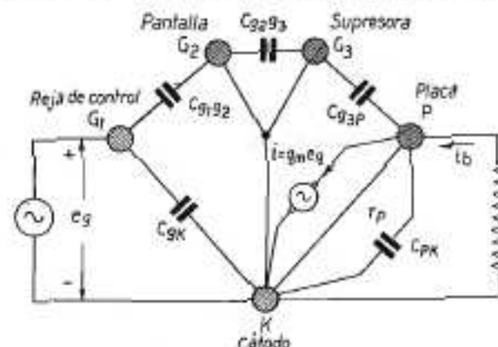


Fig. 58 — Circuito equivalente del pentodo. Se ha omitido la representación de las capacitancias que existen entre G_1 y G_3, entre G_2 y P, y entre G_1 y P para simplificar la figura.

EJEMPLO. ¿Cuál es la ganancia de un pentodo 6SJ7 trabajando en las condiciones que se dan en la tabla de la página 47, con una resistencia de carga de 50 000 ohms? ¿Cuál será la ganancia conectándolo como triodo con la misma carga?

SOLUCIÓN. Aplicando la fórmula (48) para calcular la ganancia como pentodo:

$$A = g_m R_b = 1650 \times 10^{-6} \times 50\,000 = 82.5$$

Para calcular la ganancia como triodo aplicamos la fórmula (33):

$$A = \frac{\mu R_b}{r_p + R_b} = \frac{19 \times 50\,000}{7600 + 50\,000} = \frac{950\,000}{57\,600} = 16{,}5$$